



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Exploración e instrumentación geotécnica para depósitos de jales**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Luis Alfonso Rodríguez Mora

**ASESOR DE INFORME**

M.I. Víctor Andrés Lojero Ochoa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



## DEDICATORIAS

A **Dios**. Por darme la salud y la fortaleza necesaria para vencer mis obstáculos y llegar hasta este momento.

A mi **madre**. Por ser mi más grande ejemplo de fuerza, coraje y decisión, y por haberme inspirado siempre a alcanzar mis metas, además de brindarme su amor, apoyo y comprensión incondicional durante toda mi vida. Muchas gracias.

A mi **padre**. Por su orientación, consejos y apoyo en mis proyectos profesionales y académicos, y por haberme brindado invaluables ejemplos de superación y disciplina.

A mis **hermanos**. Por su cariño y sus enseñanzas en los momentos difíciles y, sobre todo, en los momentos de alegría.

A **Omar**. Por haberme brindado soporte, apoyo y fortaleza incondicional en los momentos más difíciles de mi vida y durante mi carrera universitaria.

A mis **amigos**. Por los momentos de alegría y por hacer más feliz las experiencias. Es difícil nombrar a todos los que me han acompañado en la vida, pero especialmente agradezco a mi cómplice y **mejor amigo**, Joseph, por compartir las mejores experiencias de la universidad y porque nunca faltarán las risas ni los consejos, gracias por estar y seguir estando siempre.



## AGRADECIMIENTOS

A todos los **profesores** que aportaron su granito de arena para que sea el profesionista y la persona que soy y, sobre todo, a mis sinodales y al **director** de este trabajo de titulación por ayudarme a cumplir este objetivo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por la oportunidad brindada de estudiar esta hermosa ingeniería, siempre estaré orgulloso y agradecido de ser egresado de la máxima casa de estudios. ¡Por mi raza hablará el espíritu!

*Atentamente*

*Luis Alfonso Rodríguez Mora*



## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	II
LISTADO DE TABLAS.....	III
GLOSARIO .....	IV
NORMAS Y PROCEDIMIENTOS .....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN.....	2
2.1 Objetivo .....	2
2.2 Justificación.....	2
3. ANTECEDENTES .....	4
4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	6
4.1 Exploración geotécnica.....	6
4.2 Instrumentación geotécnica .....	9
5. METODOLOGÍA UTILIZADA.....	12
5.1 Exploración geotécnica.....	12
5.1.1 Supervisión a pie de máquina para sondeos SPT .....	13
5.1.2 Ejecución de sondeos CPTu.....	14
5.1.3 Supervisión y logeo para sondeos en roca .....	15
5.1.4 Supervisión de hincado de tubos Shelby.....	18
5.1.5 Ejecución de pruebas de permeabilidad Lefranc .....	19
5.1.6 Ejecución de pruebas de permeabilidad Lugeon .....	21
5.2 Instrumentación geotécnica .....	22
5.2.1 Instalación de Piezómetros de Cuerda Vibrante.....	23
5.2.2 Instalación de pozos de observación .....	26
6. RESULTADOS .....	27
6.1 Exploración geotécnica .....	27
6.1.1 Sondeos SPT .....	27
6.1.2 Sondeos CPTu.....	29
6.1.3 Sondeos en roca.....	30
6.1.4 Pruebas Lefranc .....	32
6.1.5 Pruebas Lugeon .....	34



6.2	Instrumentación geotécnica .....	36
6.2.1	Piezómetros de Cuerda Vibrante .....	36
6.2.2	Pozos de observación.....	37
6.3	Generación del Sección geológico-geotécnica en Depósito 1.....	37
6.3.1	Ubicación de perfiles geotécnicos .....	39
6.3.2	Zonificación geológico-geotécnica .....	40
6.3.3	Interpretación de Sección geológico-geotécnica D1-S1 .....	41
7.	CONCLUSIONES.....	43
8.	REFERENCIAS .....	45
	ANEXO 1 Sección geológico-geotécnica D1-S1 .....	1
	ANEXO 2 Perfiles geológico-geotécnicos por sondeo .....	2

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Ubicación de Jales Sur de Met-Mex.....	5
Figura 3.2	Jales Sur con sus cinco depósitos.....	5
Figura 4.1	Imagen satelital con los sondeos ubicados. ....	9
Figura 4.2	Imagen satelital con los barrenos utilizados para instrumentación. ....	11
Figura 4.3	a) Máquina de perforación Mobile Drill. / b) Camión Hysson 200 kN para sondeos CPTu. ....	12
Figura 5.1	a) Conteo de golpes durante prueba SPT / b) Muestra de jal en tubo partido. ....	14
Figura 5.2	a) Observación de parámetros durante el hincado del cono/ b) Camión Hysson para hincado de cono. ....	15
Figura 5.3	Caja de muestras obtenidas con barrenación.....	16
Figura 5.4	Logeo realizado para la cimentación de Jales Sur. ....	17
Figura 5.5	Shelby obtenido después del hincado en un sondeo para el proyecto Jales Sur. ....	19
Figura 5.6	Medición de carga en pruebas Lefranc de flujo constante. ....	20
Figura 5.7	a) Registro de lecturas durante la ejecución de una prueba/ b) medición de obturadores. ....	21
Figura 5.8	a) Medición de profundidad del barreno para evitar azolve/ b) Registro de lecturas. ....	22
Figura 5.9	Sensor piezométrico RST modelo VW-2100-0.7. RST Instrumens Ltd (Tomado de: <a href="https://rstinstruments.com/product/vibrating-wire-piezometer/">https://rstinstruments.com/product/vibrating-wire-piezometer/</a> ). ....	23
Figura 5.10	Verificación y registro de lecturas para los PCV. ....	24
Figura 5.11	Datos y evidencia de piezómetro de cuerda vibrante antes de ser instalado. ....	25



Figura 5.12 a) Medición de azolve en el barreno. / b) Instalación del piezómetro de cuerda vibrante en el barreno.....	25
Figura 5.13 Instalación de tubería para pozos de observación.....	26
Figura 6.1 Registro de campo.....	27
Figura 6.2 Perfil estratigráfico para SPT.....	28
Figura 6.3 Perfil obtenido a partir del hincado del piezocono.....	30
Figura 6.4 Ejemplo de registro para sondeo de perforación en roca.....	31
Figura 6.5 Perfil de sondeo en roca.....	31
Figura 6.6 Registro para pruebas de permeabilidad Lefrac de carga constante.....	33
Figura 6.7 Registro de prueba de permeabilidad Lefranc para jal fino.....	34
Figura 6.8 Registro para prueba Lugeon.....	35
Figura 6.9 Gráfica de lecturas ascendentes y descendentes.....	35
Figura 6.10 Evolución de la presión de poro de un sensor instalado en jal.....	37
Figura 6.11 Ubicación de la Sección D1-S1 en Depósito 1.....	38
Figura 6.12 Corte D1-S1 con etapas de construcción.....	42

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Fallas de presas de jales con más de 100 muertos en el mundo en los últimos 10 años... 2	2
Tabla 2.2 Fallas de presas de jales en México en los últimos 10 años. ....	3
Tabla 4.1 Exploración geotécnica en Jales Sur.....	6
Tabla 4.2 Instrumentación geotécnica en Jales Sur.....	10
Tabla 5.1 Clasificación de la roca con base en el RQD.....	16
Tabla 6.1 Valores típicos de permeabilidad según el tipo de suelo, González de Vallejo (2002). .	32
Tabla 6.2 Tabla con el cálculo del valor Lugeon y la clasificación del macizo rocoso.....	36
Tabla 6.3 Coordenadas y profundidades de cada sondeo de la Sección D1-S1.....	39
Tabla 6.4 Coordenadas y profundidades de instrumentación de la Sección D1-S1.....	39
Tabla 6.5 Propiedades índice y mecánicas de las zonas geotécnicas Sección D1-S1.....	41



## GLOSARIO

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
Monitoreo	Observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros fisiológicos o de otra naturaleza para detectar posibles anomalías.
NAF (Nivel de aguas Freáticas)	El nivel superior del agua en un acuífero o más correctamente como el lugar donde la presión del agua es igual a la de la presión atmosférica. El nivel freático o también llamada capa freática o capa freática puede medirse mediante una perforación en el subsuelo.
Línea superior de corriente	Nivel de materiales saturados dentro de un depósito antropogénico, como es el caso de los depósitos de jales.
Presión de poro	Presión de poros de agua se refiere a la presión que ejerce el agua subterránea atrapada en el suelo o en la roca, en huecos situados entre el agregado llamados poros. La presión de los poros de agua por debajo del nivel freático se mide por piezómetros.
Unidad Minera (UM)	Es una instalación donde se extraen minerales y rocas con el fin de obtener algún producto o concentrado, las unidades mineras pertenecen a diversas empresas que las administran.
Piezómetro de Cuerda Vibrante (PCV)	Los piezómetros de cuerda vibrante son los piezómetros eléctricos de primera elección ya que la salida de frecuencia de los aparatos de cuerda vibrante es inmune al ruido eléctrico externo y capaz de tolerar un cableado húmedo, lo cual es común en las aplicaciones geotécnicas.
Grout	Es una mezcla de cemento y bentonita que sirve como relleno durante la instalación de instrumentos o relleno de barrenos.
In situ	In situ es una expresión latina que significa 'en el sitio' o 'en el lugar', y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.
Azolve	Materiales acumulados en el fondo del sondeo, originados por la sedimentación del material de recorte durante el desgaste y la profundización de la exploración.
Núcleo	Muestra de roca in situ que corta una broca muestreadora.
Rock Quality Designation (RQD)	Es un índice de la roca que corresponde a la suma de los tramos de núcleo mayores o iguales a 10 cm relacionados con la longitud total del tramo perforado.
Unidad Lugeon	Es la cantidad de agua en litros que acepta un metro lineal de perforación en roca por minuto a una presión de 981 kPa.
Permeabilidad o Conductividad Hidráulica(k)	La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable o no permeable si la cantidad de fluido es despreciable.
Muestreo	Es la extracción y obtención de una parte representativa de suelo, roca o jal y tiene como objetivo proporcionar muestras de la calidad requerida para la realización de ensayos en el laboratorio. Tales ensayos permiten clasificar al suelo y determinar propiedades índices o Mecánicas que son usadas para predecir el comportamiento de la masa de suelo.
Hincado	Es un método muy útil en instalaciones bajo estructuras como vías, cuerpos de agua, edificaciones, etc. El empuje se realiza mediante un martillo neumático o hidráulico, que golpea el tubo de acero, el cual penetra el suelo sin causar alteración del mismo.
Barrenación	Un barreno es un dispositivo o herramienta utilizado para realizar agujeros o pozos cilíndricos extrayendo el material sólido perforado. El material es desplazado a lo largo del sentido del eje de rotación.
Fluidos de perforación	Los fluidos de perforación son los fluidos que controlan las presiones de formación, remueven los recortes del pozo, sellan las formaciones permeables encontradas durante la perforación,



### Término

### Descripción

enfrian y lubrican el barreno, transmiten la energía hidráulica a las herramientas de fondo de pozo y a la barrena y además mantienen la estabilidad y el control del pozo.

Jal

El término "jal" es propio de México y proviene del término nahuatl "xalli" que significa arena. En otros países de habla hispana recibe distintos nombres, como colas o relaves; en cualquier caso, se refieren a los materiales sin valor que se generan durante el beneficio o concentración de minerales (Reyes, 2014). En la NOM-141 (SEMARNAT, 2003) se describe el término "jal" como el producto de la trituración y molienda del mineral una vez que se han recuperado los metales comerciales mediante procesos físicos y/o químicos. La composición de estos jales mineros puede ser muy diversa en su naturaleza tanto química como mineralógicamente, aunque generalmente consisten en partículas tamaño arena, limo y arcilla. Sus propiedades difieren de otros materiales naturales y dependen del mineral derivado y del proceso metalúrgico para la obtención de los metales o elementos clave de los minerales explotados.

Según Min, L. et al. (2020), los jales son el resultado de desecho de los procesos mineros y pueden ser de diversos tamaños, pero los más comunes van desde arcillas hasta arenas y pueden contener metales irrecuperables, reactivos químicos y agua de proceso empleada durante la extracción de materias primas.

## NORMAS Y PROCEDIMIENTOS

### Norma/Procedimiento

### Descripción

Es una norma oficial mexicana regida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y aprobada en febrero de 2004, donde se establecen los procedimientos generales para la caracterización de los jales y del sitio, así como las especificaciones y criterios para la preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas y depósitos de jales, así mismo hace mención para la instrumentación geotécnica en estos depósitos.

Esta Norma Oficial Mexicana en materia de residuos mineros nace a razón de las siguientes consideraciones:

- Debido a los impactos significativos que los residuos provenientes de plantas de beneficio de minerales producen sobre el medio ambiente, se hace necesario su control.
- Las presas de jales son uno de los sistemas para la disposición final de los residuos sólidos generados por el beneficio de minerales contemplados en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, y deben reunir condiciones de máxima seguridad, a fin de garantizar la protección de la población, las actividades económicas y sociales y, en general, el equilibrio ecológico.
- El método de prueba que establece el procedimiento para determinar la peligrosidad de los jales, propuesto en esta Norma Oficial Mexicana fue desarrollado y estandarizado para determinar las características que hacen peligrosos por su toxicidad a matrices sólidas, como son los residuos mineros y está aceptado por la comunidad científica nacional e internacional.

NOM-141 (SEMARNAT, 2003)

Además, menciona que el almacenamiento de los jales puede efectuarse en el lugar donde se generen, conforme a la información obtenida de la caracterización del sitio, aplicando



## Norma/Procedimiento

## Descripción

	<p>los criterios de protección ambiental especificados en esta Norma Oficial Mexicana para cada etapa.</p> <p>Cuando el proyecto se prevea localizarlo en alguna región terrestre prioritaria, se debe hacer del conocimiento de la autoridad competente. Los estudios, proyectos de ingeniería y demás información técnica o científica utilizada y/o generada de acuerdo a esta Norma, así como la evidencia de su cumplimiento, debe mantenerse clasificada y disponible para que la autoridad verifique su existencia y contenido en el momento que lo considere necesario. Los resultados, análisis y conclusiones de los estudios generados previo a la preparación del sitio, deben integrarse en la sección correspondiente del Informe Preventivo.</p>
NOM-052 (SEMARNAT, 1993)	Esta norma oficial mexicana establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. En el apartado 9 menciona los compuestos productos de la minería que son nocivos para el medio ambiente, además clasifica a los jales por su toxicidad al medio ambiente y al ser humano. Cabe aclarar que la NOM-052 2005 (la más actual), ya no menciona a los jales en sus listados.
NOM-053 (SEMARNAT, 1993)	Norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-157 (SEMARNAT, 2009)	Esta norma establece los elementos y procedimientos que se deben considerar al formular y aplicar los planes de manejo de residuos mineros, con el propósito de promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos, así como alentar su manejo integral a través de nuevos procesos, métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles.
ASTM D4220-95: "Practice for Preserving and Transporting Soil Samples"	Esta norma cubre los procedimientos para conservar las muestras de suelo inmediatamente después de que se obtienen en el campo y los procedimientos que las acompañan para el transporte y manejo de las muestras.
ASTM D 2487: "Standard classification of soils for engineering purposes"	Esta norma describe un sistema de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería, basados en determinaciones de laboratorio de tamaños de partículas, límites líquidos e índice de plasticidad y deben ser utilizados cuando se requiera una clasificación precisa.
ASTM D 422: "Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils"	Esta norma cubre la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de las partículas en suelos. Nos dice que la distribución de tamaños de las partículas mayores a 0.075 mm (retenidas en la malla 200) es determinado por tamizado, mientras que la distribución de tamaños de partículas menores a 0.075 mm es determinada por un proceso de sedimentación usando un hidrómetro para obtener los datos necesarios.
ASTM-D5778-07: "Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils"	Esta norma cubre el procedimiento para determinar la resistencia puntual, resistencia por fricción durante la penetración de un penetrómetro de forma cónica a medida que avanza en los suelos subterráneos a una velocidad constante.
ASTM D1587-08 (2012): "Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes"	Esta norma cubre un procedimiento para usar un tubo de metal de pared delgada para recuperar muestras de suelo relativamente intactas adecuadas para pruebas de laboratorio de propiedades de ingeniería, como resistencia, compresibilidad, permeabilidad y densidad. Se muestran los requisitos que deben cumplir los tubos de paredes delgadas que se usan en muestreadores de pistón, de tapón o de tipo rotatorio.



## Norma/Procedimiento

## Descripción

ASTM D4631-95(2000): "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using Pressure Pulse Technique"	Este método de prueba cubre un procedimiento de campo para determinar la transmisividad y capacidad de almacenamiento de formaciones geológicas que tienen permeabilidades inferiores a $10^{-3} \mu\text{m}^2$ (1 Milidarcy) utilizando la técnica de pulso de presión. Los valores de transmisividad y almacenamiento determinados por este método de prueba proporcionan una buena aproximación de la capacidad de la zona de interés para transmitir agua, si los intervalos de prueba son representativos de toda la zona y la roca circundante está completamente saturada de agua.
CFE 10100-78: "Exploración directa con obtención de muestras del suelo Prueba de Penetración Estándar"	Este procedimiento habla sobre las metodologías generales para la realización de la Prueba de Penetración Estándar, la cual consiste en el hincado de un muestreador de media caña o tubo partido, siendo esta la herramienta especializada para la obtención de muestras alteradas de suelo, permitiendo así obtener su clasificación visual y al tacto, algunas de sus propiedades y su resistencia a la penetración.
CFE 10000-73: "Realización de pruebas Lefranc"	Este procedimiento es una guía técnica para la realización de pruebas Lefranc, que sea una referencia para la ejecución de este tipo de pruebas, la cual se realiza en materiales granulares, sedimentos mal consolidados, rocas muy alteradas o deleznable e incluso a rocas muy fracturadas.
CFE 10100-79: "Muestreo de suelos con tubos de pared delgada"	Este procedimiento establece las metodologías generales para el uso de tubos de pared delgada para recuperar muestras de suelo relativamente inalteradas (tubos Shelby y Denison), además de dar una guía para el transporte y manejo de este tipo de muestras.
CFE 10000-50: "Perforación con recuperación de núcleo"	Este procedimiento es una guía para establecer los métodos generales para las actividades de perforación con recuperación de núcleos debido a que proporciona información directa de las características físicas de las rocas.
CFE 10000-48: "Realización de pruebas de permeabilidad tipo Lugeon"	Este procedimiento determina las bases para ejecución de una prueba de permeabilidad tipo Lugeon, la cual es un ensayo que consiste en la inyección de agua a presión ascendente y descendente dentro de una perforación en roca, para lo cual se aísla el tramo que se desea probar y registra la absorción durante intervalos regulares de tiempo.



## 1. INTRODUCCIÓN

En este informe de trabajo profesional se describen las actividades ejecutadas en campo para un proyecto de exploración e instrumentación geotécnica denominado como "Jales Sur" desarrollado en la metalúrgica más grande de México ubicada en la ciudad de Torreón, Coahuila, además se describen y detallan las distintas habilidades, responsabilidades, aptitudes y conocimientos que adquirí en mi desarrollo profesional como geólogo geotecnista en los ocho meses que duraron las actividades del proyecto (septiembre 2020 a abril de 2021).

La necesidad de realizar una campaña de exploración e instrumentación en los depósitos de Jales Sur nace a partir de que se planea continuar con la operación de la metalúrgica por tiempo indefinido, por lo cual, es necesario un recrecimiento de los cinco depósitos con los que se cuenta para asegurar la operación de por lo menos 10 años más de esta importante metalúrgica. Por lo anterior, es indispensable documentar y obtener información acerca de las propiedades y comportamientos de los materiales depositados en las cinco estructuras térreas debido a que no se tienen registros o modelos que permitan diseñar un recrecimiento en ninguno de los depósitos.

En este informe se describe la metodología aplicada y resultados a todos los trabajos realizados en campo para las siguientes actividades de exploración e instrumentación geotécnica:

- Sondeos de penetración estándar (SPT).
- Sondeos de hincado de piezocono (CPTu).
- Obtención de muestreo inalterado (Hincado de tubos Shelby).
- Barrenación en roca con barril HQ3.
- Ejecución de pruebas de permeabilidad Lefranc.
- Ejecución de pruebas de permeabilidad Lugeon.
- Instalación de piezómetros de cuerda vibrante (PCV).
- Instalación de pozos de observación.

Además, se muestran algunos resultados que se obtuvieron para cada tipo de sondeo, prueba in situ e instrumento instalado en las estructuras térreas.

Con la integración de los resultados para el Depósito 1 de Zona Sur, se realizó una sección geotécnica, en donde se muestran y comparan los datos obtenidos para el corte principal de este depósito, además, se integran las propiedades índice y mecánicas de los materiales analizados durante la exploración e instrumentación.

Es necesario aclarar que, posterior a los trabajos realizados de exploración e instrumentación, comienza la etapa de diseño y análisis de estabilidad, la cual, no es considerada como alcance de este informe ya que solo se involucran a las actividades de campo.



## 2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1 Objetivo

El objetivo del presente informe es describir las actividades profesionales desarrolladas durante ocho meses en un proyecto de exploración e instrumentación geotécnica para una importante metalúrgica en Torreón, Coahuila y, además, generar una sección geológico-geotécnica con el fin de mostrar la caracterización de forma física y mecánica de uno de los depósitos de jales y su terreno de cimentación para que, en la etapa de diseño, se generaren los modelos geotécnicos del sitio con el fin de definir un plan de crecimiento en el depósito de jales.

### 2.2 Justificación

Desde la antigüedad, la minería se ha constituido como un pilar para el desarrollo de la humanidad debido a la producción de materia prima necesaria para todas (o la mayoría de) las industrias, por lo tanto, es una fuente de ingreso económico muy importante para todos los países del mundo. Para el caso de México en el año de 2020, el sector minero-metalúrgico contribuyó con el 2.3% del Producto Interno Bruto nacional (Secretaría de Economía, 2020), además se ubica entre los primeros 10 principales productores de 16 diferentes minerales en el mundo, entre ellos plata, fluorita, oro, cobre, plomo, zinc, etc.

Los avances en la tecnología minera en los últimos 100 años han hecho económicamente factible extraer leyes más bajas de mineral y, por ende, aumentar los volúmenes excavados de minerales y rocas, lo cual, produce volúmenes mayores de jales en la fase de explotación para las unidades mineras (Bowker & Chambers, 2015). Las incertidumbres sobre las características físicas y químicas de los relaves, junto con las prácticas de gestión de presas, son motivo de creciente preocupación. La falta de conocimiento sobre el comportamiento de los relaves, por parte de las empresas mineras, y el bajo desempeño de los procesos de monitoreo y manejo pueden considerarse como los principales factores para la ocurrencia de fallas en las presas, las cuales han resultado en tragedias humanas, pérdidas económicas y en desastres ambientales.

Según la organización Wise Uranium Project (2022) indica que desde 1915 se han registrado un total de 257 fallas de presas de jales en el mundo con cerca de 2,650 muertes y 250 millones de metros cúbicos de residuos contaminados liberados al medioambiente. Casi el 50% (115 millones de m<sup>3</sup>) de los volúmenes publicados se registraron después del año 2000, contando alrededor de 640 muertes. En la Tabla 2.1 se enlistan las fallas con más de 100 muertos ocurridas en el mundo en los últimos 10 años.

Tabla 2.1 Fallas de presas de jales con más de 100 muertos en el mundo en los últimos 10 años.

No	Mina	Compañía	Ubicación	Producto	Fecha del incidente	Volumen liberado (m <sup>3</sup> )	Alcance (km)	Muertes
1	Hpakant	N/D	Kachin, Myanmar, Birmania	Jade	2 de julio de 2020	N/D	N/D	174



No	Mina	Compañía	Ubicación	Producto	Fecha del incidente	Volumen liberado (m3)	Alcance (km)	Muertes
2	Córrego do Feijão	Vale	Minas Gerais, Brazil	Fe	25 de enero de 2019	9,570,000	600	270
3	San Kat Kuu	Hpakant Jade Mines	Kachin, Myanmar, Birmania	Jade	21 de noviembre de 2015	N/D	N/D	115

Estos registros de datos muestran que la necesidad de almacenar de manera segura los desechos mineros está creciendo tanto en escala como en complejidad y que cada vez ponen más en riesgo a las poblaciones cercanas debido al crecimiento poblacional y el aumento de los volúmenes de almacenamiento.

Con base en los estudios realizados por Franks, Boger, Cote & Mulligan (2011), la amenaza se complica aún más por la mayor gravedad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos debido al cambio climático, ya que, fenómenos como las fuertes lluvias causados por el aumento de los huracanes, han sido identificadas como el desencadenante de las fallas en presas de jales en el 25% del mundo (Hu, y otros, 2021).

Para el caso de México, se han registrado 5 fallas de presas de jales en los últimos 10 años (Tabla 2.2), registrando 9 muertes en total y considerables daños ambientales a las poblaciones cercanas, de ahí nace la importancia de conocer y monitorear el comportamiento de los materiales almacenados en estos depósitos mineros mediante la exploración e instrumentación geotécnica.

Tabla 2.2 Fallas de presas de jales en México en los últimos 10 años.

No	Mina	Compañía	Ubicación	Producto	Fecha del incidente	Volumen liberado (m3)	Alcance (km)	Muertes
1	Río Pánuco	Río Pánuco	Concordia, Sinaloa	Ag, Cu, Pb, Zn	13 de octubre de 2021	N/D	4	0
2	San José Los Manzanos	Minerales de Topia	Canelas, Durango	Pb, Zn	1 de mayo de 2020	6,000	5	0
3	Cieneguita	Minera Río Tinto	Urique, Chihuahua	Au, Ag	4 de junio de 2018	439,000	2	7
4	Dos Señores	Minerales Santa Rosa	La Concordia, Sinaloa	Au, Ag	16 de octubre de 2014	10,800	1	0
5	El Herrero	Grupo Minero Bacís	Barrancas, Durango	Au, Ag	20 de enero de 2013	300,000	130	4

Para el correcto almacenamiento de los jales mineros es indispensable conocer las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales sobre los que se van a almacenar los depósitos,



así como de los materiales almacenados, debido a que, la falta de conocimiento sobre el comportamiento de los jales y el desempeño deficiente del monitoreo, han resultado en fallas desastrosas para los depósitos con pérdidas humanas y económicas, así como enormes consecuencias ambientales para los ecosistemas y las comunidades locales (Martínez, Mendoza, Rey, Sandoval, & Hidalgo, 2021).

Por todo lo anterior, queda claro que, si se quiere asegurar la estabilidad de los depósitos de jales en cualquier mina del mundo, como el caso de estudio de este informe, las actividades de exploración e instrumentación geotécnica son de vital importancia en la minería para poder realizar el diseño y la ingeniería necesaria para mantener mínimo el riesgo de alguna falla en el depósito que ponga en peligro a la población y el medio ambiente.

### 3. ANTECEDENTES

Localizado al Sur-Oeste de la ciudad de Torreón, Coahuila se encuentran cinco estructuras térreas que tienen la función de almacenar residuos sólidos producto de la metalúrgica que se encuentra en dicha ciudad, el conjunto de depósitos que se encuentran en esta ciudad es llamado "Jales Sur" (Figura 3.1) y pertenece al complejo metalúrgico no-ferroso más grande de América Latina y el cuarto más grande del mundo.





Figura 3.1 Ubicación de Jales Sur de Met-Mex.

En términos generales, Jales Sur está formada por los depósitos de jales de la metalúrgica Met-Mex y consisten en un almacenamiento de residuos mineros productos del proceso que se da en las plantas. De acuerdo con la evidencia histórica, el almacenamiento se ha realizado desde el año 1900 y se ha dado bajo un proceso de colocación heterogéneo y sin un control adecuado de la documentación del mismo.

Debido a que la metalúrgica continuará operando por tiempo no definido, es necesario recrecer los depósitos de esta zona para almacenar jales por al menos 10 años más y así continuar la operación de estos depósitos y, por consiguiente, de la metalúrgica, pero, por la falta de información acerca de las propiedades y el comportamiento de los jales ya depositados, fue indispensable realizar una campaña de exploración e instrumentación geotécnica con el fin de caracterizar y monitorear los materiales para poder realizar la ingeniería, los modelos y el diseño adecuado para los futuros proyectos de crecimiento de Jales Sur. Esta campaña de exploración e instrumentación geotécnica se realizó en los cinco depósitos de jales, los cuales son mostrados en la Figura 3.2.

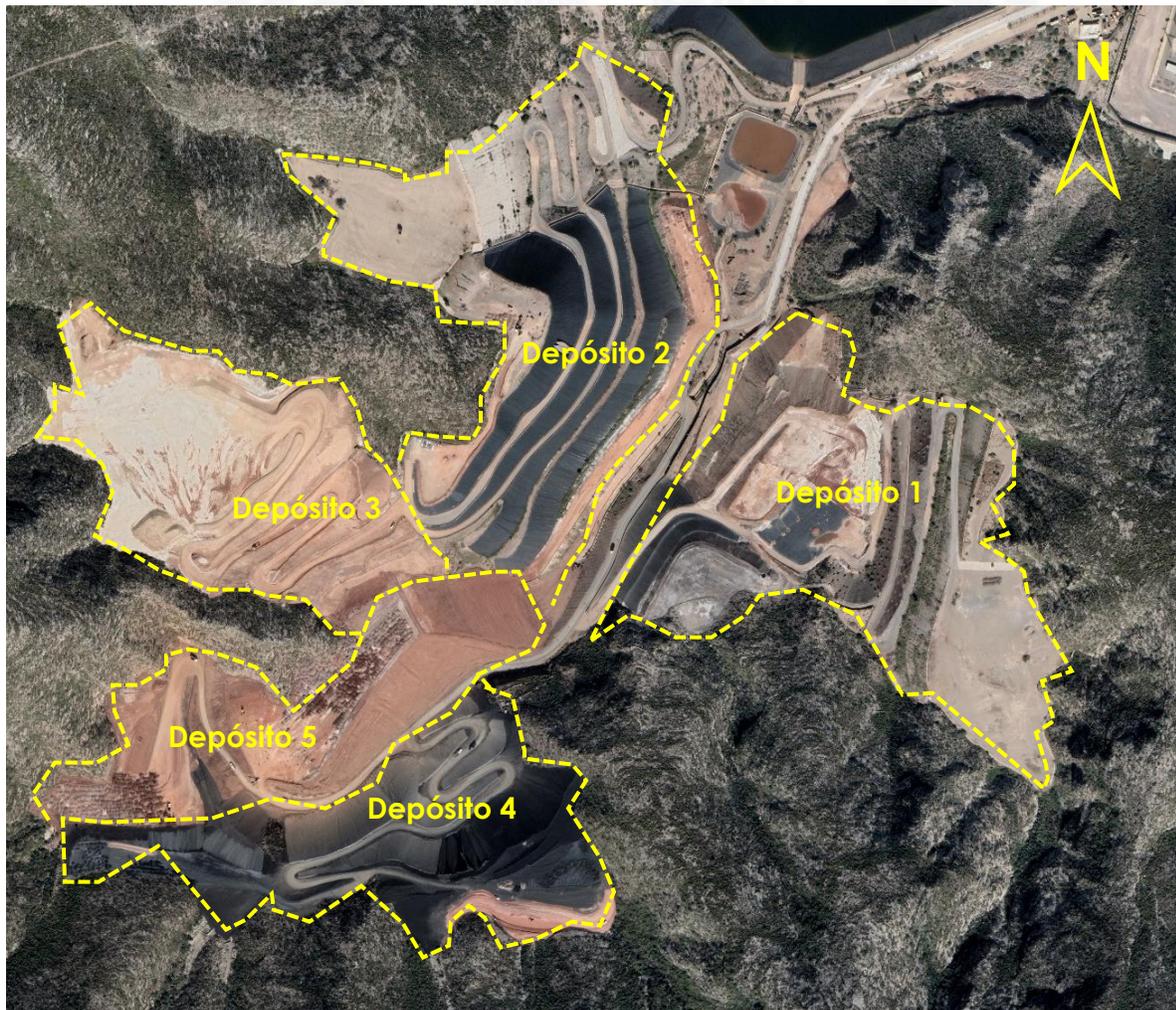


Figura 3.2 Jales Sur con sus cinco depósitos.



Para cada uno de los depósitos se realizaron sondeos directos, pruebas de permeabilidad en el jal y macizo rocoso, muestreo inalterado (con tubo shelby) e instalación de instrumentación geotécnica.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para el proyecto que llevó por nombre “Exploración e instrumentación geotécnica Jales Sur” se llevaron a cabo diferentes tipos de sondeos e instalaciones de instrumentación con el fin de caracterizar física, mecánica e hidráulicamente todos los depósitos de jales para comenzar un crecimiento y aumentar el depósito de material proveniente de la metalúrgica. Como lo indica el nombre del proyecto, se contemplaron únicamente actividades de exploración e instrumentación geotécnica, es decir, las etapas de anteproyecto, diseño e ingeniería no fueron consideradas dentro de los alcances del proyecto.

##### 4.1 Exploración geotécnica

Para el proyecto realizado en Jales Sur se llevó a cabo la exploración geotécnica con el fin de caracterizar los depósitos de jales y realizar las recomendaciones de ingeniería necesarias para el diseño y la construcción del recrecimiento de todos los depósitos. Los objetivos particulares de la exploración geotécnica fueron:

- Realizar una zonificación geológico-geotécnica de los jales y la cimentación con base en el comportamiento y en los parámetros mecánicos obtenidos en la exploración.
- Extraer muestras representativas de cada estrato de jal, suelo natural y cimentación de los depósitos.
- Realizar pruebas de permeabilidad para modelar el flujo de agua dentro del depósito.
- Determinar la profundidad del contacto suelo-roca.
- Proporcionar los estudios para generar el plan de instrumentación.

La exploración realizada en Jales Sur consistió en la ejecución de 39 sondeos SPT, 54 sondeos CPTu, 39 sondeos en roca, 40 pruebas de permeabilidad tipo Lefranc, 20 pruebas de permeabilidad tipo Lugeon y 21 muestreos inalterados con tubo Shelby; el nombre del sondeo, las coordenadas y el tipo de sondeo realizado en cada barreno fueron proporcionadas por el equipo de diseño con base en la información recopilada previa de la zona de estudio y se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Exploración geotécnica en Jales Sur.

Depósito	Sondeo	Coordenadas (UTM)		SPT	CPTu	Sondeos en roca	Prueba Lugeon	Prueba Lefranc	Muestra inalterada
		X	Y						
1	ZS-D1-01	656092	2822160	✓	✓	✓	✓	2	2
	ZS-D1-02	656049	2822185		✓	-	-	-	-
	ZS-D1-03	656001	2822236	✓	✓	✓	-	-	-
	ZS-D1-04	655962	2822280	✓	✓	✓	✓	2	1
	ZS-D1-05	655912	2822319		✓				



Depósito	Sondeo	Coordenadas (UTM)		SPT	CPTu	Sondeos en roca	Prueba Lugeon	Prueba Lefranc	Muestra inalterada	
		X	Y							
	ZS-D1-06	655851	2822362	✓	✓	✓	✓	2	1	
	ZS-D1-07	655806	2822415	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D1-08	656033	2822139		✓	-	-	-	-	
	ZS-D1-09	655964	2822202	✓	✓	✓	✓	2	1	
	ZS-D1-10	655884	2822277	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D1-11	656021	2822338	✓	✓	✓	✓	2	1	
	ZS-D1-12	655961	2822361	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D1-13	655904	2822401		✓	-	-	-	-	
	ZS-D1-14	655806	2822324	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D1-15	656043	2822290		✓	-	-	-	-	
	2	ZS-D2-01	655461	2822594	✓	✓	✓	✓	2	1
		ZS-D2-02	655525	2822611	✓	✓	✓	-	-	-
		ZS-D2-03	655585	2822634	✓	✓	✓	✓	2	1
		ZS-D2-04	655637	2822664	✓	✓	✓	-	-	-
		ZS-D2-05	655703	2822702		✓	-	-	-	-
ZS-D2-06		655567	2822524	✓	✓	✓	-	-	-	
ZS-D2-07		655662	2822570		✓	-	-	-	-	
ZS-D2-08		655709	2822603	✓	✓	✓	✓	2	1	
ZS-D2-09		655490	2822553		✓	-	-	-	-	
ZS-D2-10		655592	2822442	✓	✓	✓	✓	2	1	
ZS-D2-11		655640	2822434		✓	-	-	-	-	
ZS-D2-12		655684	2822422	✓	✓	✓	✓	2	1	
ZS-D2-13		655526	2822345	✓	✓	✓	-	-	-	
ZS-D2-14		655573	2822313		✓	-	-	-	-	
ZS-D2-15		655606	2822287	✓	✓	✓	✓	2		
3	ZS-D3-01	655203	2822400	✓	✓	✓	✓	2	1	
	ZS-D3-02	655263	2822369		✓	-	-	-	-	
	ZS-D3-03	655316	2822333	✓	✓	✓	✓	2	1	
	ZS-D3-04	655362	2822287	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D3-05	655413	2822259		✓	-	-	-	-	
	ZS-D3-06	655444	2822232	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D3-07	655360	2822380	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D3-08	655420	2822329	✓	✓	✓	-	-	-	
	ZS-D3-09	655461	2822294		✓	-	-	-	-	
	ZS-D3-10	655479	2822268	✓	✓	✓	✓	2	1	



Depósito	Sondeo	Coordenadas (UTM)		SPT	CPTu	Sondeos en roca	Prueba Lugeon	Prueba Lefranc	Muestra inalterada
		X	Y						
	ZS-D3-11	655215	2822335	✓	✓	✓	-	-	-
	ZS-D3-12	655267	2822293		✓	-	-	-	-
	ZS-D3-13	655325	2822258	✓	✓	✓	-	-	-
	ZS-D3-14	655384	2822230	✓	✓	✓	✓	2	1
	ZS-D3-15	655182	2822369		✓	-	-	-	-
4	ZS-D4-01	655641	2821934	✓	✓	✓	✓	2	1
	ZS-D4-02	655610	2821959	✓	✓	✓	-	-	-
	ZS-D4-03	655553	2821992	✓	✓	✓	✓	2	
	ZS-D4-04	655504	2822063	✓	✓	✓	✓	2	1
	ZS-D4-05	655466	2821980	✓	✓	✓	-	-	-
5	ZS-D5-01	655227	2822067	✓	✓	✓	✓	2	2
	ZS-D5-02	655294	2822082	✓	✓	✓	-	-	-
	ZS-D5-03	655366	2822084	✓	✓	✓	✓	2	2
	ZS-D5-04	655424	2822089	✓	✓	✓	-	-	-

Cada uno de estos sondeos fue distribuido de tal manera que se pudiera obtener la mayor cantidad de información disponible en el proyecto, además, se ubicaron para poder obtener uno o más secciones geotécnicas de cada depósito para ser modelados y zonificados por el equipo de ingeniería. La ubicación de cada sondeo se muestra en la Figura 4.1.

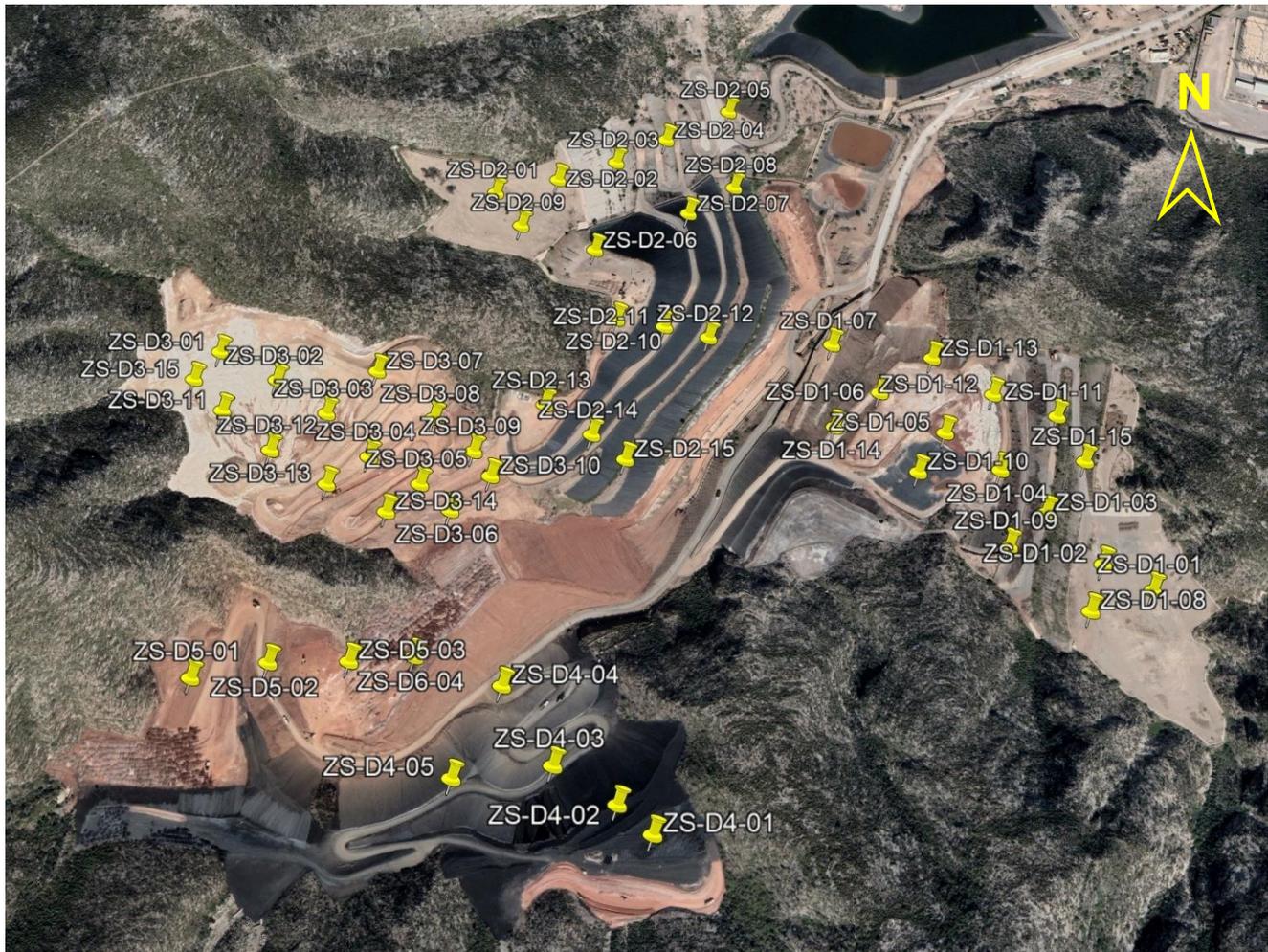


Figura 4.1 Imagen satelital con los sondeos ubicados.

Los datos recopilados para cada uno de los sondeos y pruebas realizadas durante la etapa de exploración fueron utilizados para realizar el plan de instrumentación de los depósitos de jales.

## 4.2 Instrumentación geotécnica

La instrumentación en el proyecto Jales Sur fue sumada después de haber realizado una caracterización física y mecánica de los jales en la etapa de exploración geotécnica y consistió en la colocación y disposición de instrumentos como PCV (piezómetros de cuerda vibrante) por método de grouting y pozos de observación con el fin de monitorear y controlar distintos parámetros geotécnicos como la presión de poro y nivel freático de cada depósito. Los objetivos particulares para la etapa de instrumentación fueron:

- Monitorear y controlar los parámetros de presión de poro, niveles piezométricos y nivel freático de los depósitos de jales.
- Modelar el flujo de agua y los materiales con las condiciones actuales de cada depósito.
- Registrar el comportamiento de los depósitos en temporada de lluvias.



En total, se realizó la instalación de 56 Piezómetros de Cuerda Vibrante (PCV) y 8 pozos de observación, los cuales son mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Instrumentación geotécnica en Jales Sur.

Depósito	Sondeo	Coordenadas (UTM)		PCV	Pozo de observación
		X	Y		
1	ZS-D1-01	656092	2822160	4	-
	ZS-D1-04	655962	2822280	3	-
	ZS-D1-06	655851	2822362	-	✓
	ZS-D1-07	655806	2822415	2	-
	ZS-D1-11	656021	2822338	2	-
	ZS-D1-14	655806	2822324	2	-
2	ZS-D2-01	655461	2822594	4	-
	ZS-D2-03	655585	2822634	3	-
	ZS-D2-04	655637	2822664	-	✓
	ZS-D2-08	655709	2822603	2	-
	ZS-D2-10	655592	2822442	2	-
	ZS-D2-12	655684	2822422	-	✓
	ZS-D2-15	655606	2822287	-	✓
3	ZS-D3-01	655203	2822400	4	-
	ZS-D3-03	655316	2822333	3	-
	ZS-D3-04	655362	2822287	-	✓
	ZS-D3-06	655444	2822232	3	-
	ZS-D3-07	655360	2822380	2	-
	ZS-D3-08	655420	2822329	2	-
	ZS-D3-10	655479	2822268	-	✓
	ZS-D3-13	655325	2822258	3	-
	ZS-D3-14	655384	2822230	2	-
4	ZS-D4-01	655641	2821934	2	-
	ZS-D4-03	655553	2821992	2	-
	ZS-D4-04	655504	2822063	-	✓
	ZS-D4-05	655466	2821980	2	-
5	ZS-D5-01	655227	2822067	3	-
	ZS-D5-02	655294	2822082	2	-
	ZS-D5-03	655366	2822084	-	✓
	ZS-D5-04	655424	2822089	2	-

Cada instrumento instalado en los depósitos de jales fue distribuido con base en las zonas con mayor contenido de agua que se encontraron durante la ejecución de los sondeos, además, en cada barreno utilizado para instalación de piezómetros se colocó un PCV en el límite entre el jal



y el terreno natural para monitorear el flujo de agua en estas zonas. La ubicación de cada barreno con instrumentación instalada se observa en la Figura 4.2 y, como se puede apreciar, varios barrenos que se realizaron para exploración fueron utilizados para la instrumentación.



Figura 4.2 Imagen satelital con los barrenos utilizados para instrumentación.

Para todas estas actividades fue necesario contar con tres máquinas de perforación que realizaran los barrenos para toda la exploración y la instrumentación, las cuales fueron máquinas hidráulicas de la marca *Mobile Drill* modelo B-61, estas máquinas son especializadas en perforación geotécnica para suelos y roca y se utilizaron para ejecutar sondeos SPT y sondeos con barril HQ, además, con ayuda de estas máquinas, se realizó la barrenación para las pruebas de permeabilidad y la instalación de instrumentación en los cinco depósitos de jales. Para el caso de los CPTu toda la sarta de perforación y los equipos se encontraron dentro de un camión Hysson 200 kN de la marca *a.p. van den berg*, este camión es todo terreno con tracción en las 6 ruedas y ejerce una carga de 20 toneladas para el hincado del piezocono eléctrico y así ejecutar los sondeos CPTu.



Figura 4.3 a) Máquina de perforación Mobile Drill. / b) Camión Hysson 200 kN para sondeos CPTu.

## 5. METODOLOGÍA UTILIZADA

### 5.1 Exploración geotécnica

Para el caso de la exploración geotécnica en Jales Sur la metodología utilizada se basó en el apartado 5.3.3 (Aspectos geotécnicos) de la NOM-141, donde menciona los aspectos geotécnicos que se deben considerar para caracterizar el sitio donde se ubicará la presa de jal, los cuales están relacionados con la exploración geotécnica y son:

- Se debe describir la estructura geológica general y al detalle; las propiedades mecánicas de las formaciones rocosas, especialmente las relativas a su permeabilidad y resistencia; las condiciones de fisuramiento y orientación, amplitud, separación y profundidad de las fisuras; el grado y profundidad actual de la roca intemperizada y posibilidades de alteración futura, por los agentes del intemperismo.
- Determinar las propiedades mecánicas de los depósitos de suelo, en lo que se refiere a su estratigrafía, haciendo resaltar la homogeneidad o heterogeneidad de los mismos, el tipo de suelo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), así como su permeabilidad, porosidad, compresibilidad y resistencia al corte.
- Determinar la región sísmica donde se ubica el sitio con base en la información de las Regiones sísmicas en la República Mexicana.

En esta norma, algunos de los aspectos geotécnicos que se deben considerar para poder realizar una evaluación correcta de la estabilidad y las propiedades de los jales de depósitos y presas ya construidas no son mencionados, ya que se centra únicamente en los estudios previos y cimentaciones del terreno en el que se construirá el depósito de jales.

Para la realización de los ensayos de campo se tomaron en cuenta los lineamientos establecidos en la normativa ASTM, la cual se muestra como referencia en el GLOSARIO.



Sumado a esto, en sitio se tomaron en cuenta las observaciones y recomendaciones generadas por parte de la supervisión de los depósitos. A continuación, se detalla la metodología y actividades realizadas para cada tipo de sondeo y prueba en el proyecto de Jales Sur.

### **5.1.1 Supervisión a pie de máquina para sondeos SPT**

Como se mencionó en capítulos anteriores, se realizaron 39 sondeos con SPT en los cinco depósitos de jales, para la ejecución de estos sondeos se tomó como referencia la norma ASTM D1586, la cual estandariza esta prueba de penetración estándar. Es importante señalar que el equipo implementado en el proyecto de exploración fue mediante un martinete de tipo automático adaptado a cada una de las máquinas de perforación con el objetivo de mantener en forma constante la energía de impacto en cada uno de los golpes realizados sobre el muestreador y con ello despreocupar en lo posible el error humano.

Las actividades que realicé como supervisor a pie de máquina, durante la ejecución de sondeos SPT, consistieron en el registro de los golpes en intervalos de 15 cm, profundidades y cualquier otro dato relevante obtenido en campo como la pérdida de agua a cierta profundidad, cambios repentinos en el jal, etc. Además, después de sacar el tubo partido y de extraer la muestra realicé la descripción en campo tomando en cuenta las siguientes características del material:

- Longitud de la muestra recuperada.
- Color.
- Estructuras presentes (como grumos, materiales ajenos al jal, etc.).
- Tamaño de grano.
- Presencia de agua.
- Intercalaciones de materiales.
- Plasticidad.
- Resistencia al estado seco.

Como el ingeniero supervisor de los sondeos SPT también fui el encargado de asegurar que las muestras extraídas del jal fueran correctamente etiquetadas y almacenadas, así como lo marca la norma ASTM D4220-95 (2007) y el procedimiento de la CFE (Exploración Directa con Obtención de Muestras del Suelo, 2013). Entre otras actividades realizadas durante la ejecución de los sondeos SPT realicé las siguientes actividades:

- Verifiqué que se encontrara toda la herramienta necesaria para realizar el sondeo (barras de perforación, brocas, tubos partidos, canastillas, etc.), además de verificar la calidad de la misma.
- Inspeccioné y verifiqué que el azolve haya sido retirado de manera correcta previo a la realización de cada prueba SPT, es decir, que se haya barrenado con la herramienta correcta y a las profundidades estimadas.
- Aseguré que la máquina perforadora y la sarta de barras se encuentren niveladas y verticales antes de comenzar cada prueba y que se contara con los espacios adecuados para realizar las maniobras correspondientes a la perforación, muestreo y tendido de herramienta.



- Supervisé que las herramientas, materiales y equipos utilizados cumplieran con las especificaciones de la norma ASTM D4220-95 (2007).
- Verifiqué que los marcajes y longitudes de hincado sean las correctas.
- Registré el número de golpes de cada intervalo de 15 cm (Figura 5.1).
- Llevé el control de las profundidades para evitar un error de correlación al momento de muestrear o perforar.
- Registré cada detalle o anomalía encontrada durante la perforación como la cantidad de agua ocupada para la perforación, los cambios en los materiales, etc.
- Evidencié las actividades realizadas antes y durante la ejecución de las pruebas SPT en registros fotográficos, reportes y bitácoras.



Figura 5.1 a) Conteo de golpes durante prueba SPT / b) Muestra de jal en tubo partido.

### 5.1.2 Ejecución de sondeos CPTu

Para el proyecto en Jales Sur se realizaron 54 sondeos CPTu y se utilizó como referencia la norma ASTM D 5778, la cual, definen los métodos de hincado para realización de sondeos CPTu. La importancia de realizar estos sondeos en Jales Sur fue que se obtuvieron y corroboraron los parámetros de resistencia de los jales como la penetración por punta ( $q_c$ ) y la fricción que se desarrolla en el fuste durante la penetración ( $f_s$ ), además de esto se obtuvo la presión de poros ( $u$ ), lo cual fue de vital importancia para definir los estratos de jal en donde se instalaría instrumentación y se realizarían pruebas de permeabilidad de tipo Lefranc.

Mi participación profesional en este proyecto fue como supervisor de sondeos CPTu, en donde realicé las siguientes actividades particulares:

- Verifiqué que se encontrara toda la herramienta necesaria para realizar el sondeo (barras de perforación necesarias, cableado, monitores, etc.).
- Verifiqué que las herramientas, materiales y equipos utilizados cumplieran con las especificaciones de la norma ASTM D 5778 (2007).



- Instalé el equipo de empuje y el conjunto de sonda y sarta verticalmente, así como verificar las conexiones y ceros iniciales.
- Revisé las profundidades objetivo definidas para realizar el sondeo CPTu con base en sondeo previos realizados en esa zona para, de esta forma, tener claros los objetivos y compartirlos con el equipo de trabajo.
- Inspeccioné y verifiqué que la capa de suelo más dura en la superficie haya sido retirada mediante perforación o excavación.
- Monitoreé el comportamiento de los parámetros durante el hincado del sondeo para evitar dañar el sensor del piezocono.
- Di seguimiento a la inclinación de la sarta de perforación para evitar que se “amarre” o se atrape dentro del jal.
- Estuve al tanto de un cambio de presión de poro en los materiales para realizar la prueba de disipación en la profundidad correcta y de cualquier anomalía, como un aumento en la resistencia de punta, presión de poro, fricción de fuste o ángulo de inclinación abrupto de la tubería.



Figura 5.2 a) Observación de parámetros durante el hincado del cono/ b) Camión Hysson para hincado de cono.

### 5.1.3 Supervisión y logeo para sondeos en roca

Los sondeos en roca para el proyecto de Jales Sur fueron la continuación de los sondeos SPT, es decir, se realizaron 39 sondeos que comenzaron en cuanto hubiera rechazo de herramienta para los sondeos de penetración, en ese momento se cambiaba de herramienta para comenzar a barrenar con barril HQ3, el cual tiene un diámetro de 9.67 cm y consta de una broca de carburo de tungsteno incrustada con diamantes para poder recolectar muestras de roca como la que se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3 Caja de muestras obtenidas con barrenación.

Para los sondeos en roca se utilizó como referencia la norma ASTM D2113-14, la cual estandariza las prácticas y métodos para obtención de núcleos de roca durante la barrenación. En esta norma se detallan las descripciones que deben registrarse para las muestras de roca, es decir, para realizar una clasificación cualitativa la cual contiene a la litología, estructuras geológicas, profundidades y contactos litológicos de los núcleos hallados.

Para realizar una clasificación cuantitativa de la roca se realiza con el sistema *Rock Quality Designation (RQD)* o Designación de Calidad de Roca, que fue desarrollado para proveer una estimación cuantitativa de la calidad de masa de roca, expresado en porcentaje que clasifica a las muestras obtenidas en un rango de (muy pobre a muy buena), como lo muestra la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Clasificación de la roca con base en el RQD.

RQD (%)	Calidad de la roca
≤ 25	Muy mala
> 25- 50	Mala
>50-75	Regular
>75-90	Buena
>90-100	Excelente

El “RQD” está definido y normalizado por la ASTM-D 6032 como un porcentaje de piezas intactas de núcleos perforados mayores a 10 cm de longitud, expresadas matemáticamente en la siguiente ecuación:

$$RQD = \left( \frac{\sum \text{Longitud de piezas de núcleo perforados mayores a 10 cm}}{\text{Longitud total perforada}} \right) * 100$$

Ecuación 5.1 Cálculo del valor numérico de RQD en porcentaje según ASTM-D6032.



Las actividades que realicé como supervisor a pie de máquina para los sondeos de perforación en roca fueron principalmente el logueo (Figura 5.4), que incluye la clasificación cuantitativa y cualitativa explicada anteriormente.



Figura 5.4 Logueo realizado para la cimentación de Jales Sur.

Otras de las responsabilidades y actividades como supervisor a pie de máquina durante la ejecución de sondeos en roca que realicé son las siguientes:

- Verifiqué las profundidades objetivo definidas para realizar el sondeo con base en sondeos o perforaciones previas realizadas en esa zona para, de esta forma, tener claros los objetivos y compartirlos con el equipo de trabajo.
- Aseguré que se contara con toda la herramienta necesaria para realizar el sondeo (barras de perforación necesarias, brocas, coples, etc.), además verifiqué la calidad de la misma.
- Registré los intervalos de las corridas de perforación, las profundidades de perforación, estructuras geológicas presentes, el color, tamaño de grano de la roca, presencia de agua, alteraciones, intercalaciones de material, rugosidad de las discontinuidades, persistencia, abertura, relleno de las discontinuidades y el RQD obtenido de la roca.
- Aseguré que la máquina perforadora y la sarta de barras se encuentren niveladas y verticales antes de comenzar la prueba y que se contaran con los espacios adecuados para realizar las maniobras correspondientes a la perforación, muestreo y tendido de herramienta.
- Realicé la verificación de los marcajes y longitudes para asegurar que fueran las correctas.
- Marqué los núcleos de la roca y ordenarlos en la caja de muestreo con base en la orientación de barrenación.

Estas actividades también se describen en el manual de operaciones de la CFE 10000-50.



#### 5.1.4 Supervisión de hincado de tubos Shelby

En el proyecto de exploración en Jarositas Sur se realizó el hincado de 21 tubos Shelby con base en la norma ASTM D 2487 (2007) y para su extracción se realizaron barrenos hasta la profundidad deseada, sin emplear fluidos de perforación para evitar la saturación del terreno de donde se pretendía hincar el tubo, posteriormente se hincó el tubo Shelby para la obtención de muestras inalteradas de jal representativo. Para realizar el muestreo y el manejo correcto de la muestra se utilizó como referencia el Manual de Muestreo de Suelos con Tubos de Pared Delgada (CFE, 2013) y la norma ASTM-1587, la cual, estandariza los métodos para manejo de tubos Shelby después de haber obtenido la muestra.

Como supervisor encargado del muestreo inalterado realicé las siguientes actividades:

- Verifiqué las profundidades objetivo definidas para realizar el muestreo inalterado, de esta forma, se tuvieron claros los objetivos y fueron compartirlos con el equipo de trabajo.
- Realicé la verificación de toda la herramienta necesaria para realizar el sondeo (barras de perforación, tubos necesarios, coples, etc.) con base en la norma ASTM D1578-08 (2012) y el transporte y almacenamiento de la muestra con la norma ASTM D4220-95(2007).
- Aseguré que la máquina perforadora y la sarta de barras se encuentren niveladas y verticales antes de comenzar la prueba y que se contara con los espacios adecuados para realizar las maniobras correspondientes a la perforación, muestreo y tendido de herramienta.
- Verifiqué que los marcajes y longitudes de hincado sean las correctas.
- Registré profundidades, tiempos, ubicación y tipo de material extraído.
- Después de obtener la información mencionada, procedí al correcto almacenaje de cada uno de los tubos, recubriendo los extremos con espuma de poliuretano, tapas y una cubierta o película para emplayar los tubos, con la finalidad de protegerlos de pérdidas de agua.



Figura 5.5 Shelby obtenido después del hincado en un sondeo para el proyecto Jales Sur.

### 5.1.5 Ejecución de pruebas de permeabilidad Lefranc

Para el proyecto de Jales Sur se realizaron 40 pruebas de permeabilidad tipo Lefranc, las cuales sirvieron para definir el valor de la permeabilidad (K) en jales y en rocas muy fracturadas. El ensayo Lefranc se aplicó en el interior de los barrenos durante la ejecución de las actividades realizadas para la barrenación, es decir, se llegaba a una profundidad estimada y se realizaba el ensayo para posteriormente continuar con la barrenación.

Debido a que los jales de los depósitos del proyecto en cuestión tienen un comportamiento de arcillas y limos, se realizó la prueba de permeabilidad Lefranc de carga variable, es decir, se registró el descenso del nivel dentro del barreno, en intervalos iguales de tiempo.

Por otro lado, para la roca muy fracturada o aluvión se realizaron las pruebas de permeabilidad Lefranc de carga constante debido a que el agua no tardaba mucho en infiltrarse en los materiales y, para este caso, se registra el volumen de agua utilizado para mantener la misma carga en ciertos intervalos de tiempo (Figura 5.5).

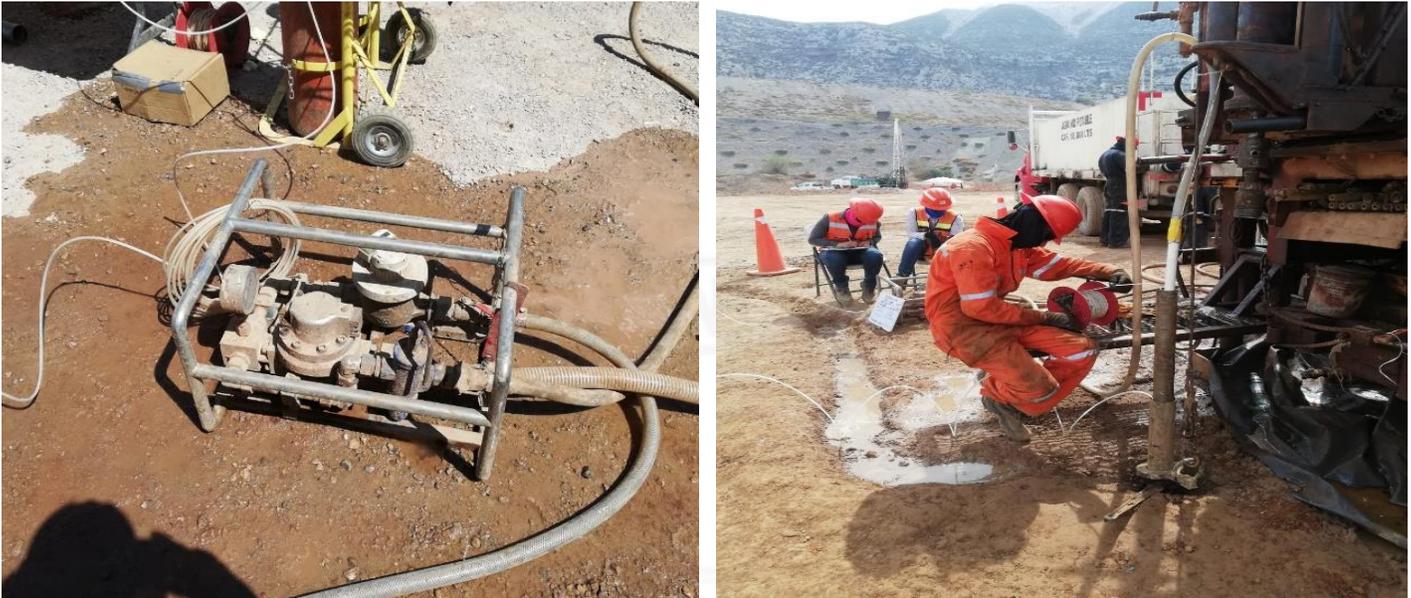


Figura 5.6 Medición de carga en pruebas Lefranc de flujo constante.

Básicamente el tipo de prueba que se realizó para los materiales en el proyecto de Jales Sur estuvo regido por la interpretación del comportamiento del sitio; por ejemplo, la velocidad de infiltración, la saturación del medio poroso, la existencia del nivel freático y lo mencionado en los dos puntos anteriores. Para la ejecución de todas las pruebas de permeabilidad en el proyecto se utilizó un obturador de diámetro HQ para aislar el tramo ensayado.

Las actividades que realicé como ejecutor en las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc fueron:

- Verifiqué los materiales que se encuentran en los intervalos que abarcará la prueba de permeabilidad Lefranc para definir el tipo de prueba que se realizará (verificar los ensayos previos en el sitio), además de contar con los registros de perforación para conocer, de manera general, el comportamiento del suelo en donde se realizará la prueba.
- Realicé la inspección del equipo y material necesario para realizar la prueba (obturadores, mangueras, bombas de agua, tuberías, gas para obturadores, ademe, etc.).
- Registré los intervalos de las corridas de perforación (Figura 5.7), las profundidades de la prueba, la carga de agua, el volumen utilizado, el tiempo y las mediciones necesarias.
- Que se dispongan de los espacios adecuados para realizar las maniobras correspondientes a la perforación, muestreo y tendido de herramienta.



Figura 5.7 a) Registro de lecturas durante la ejecución de una prueba/ b) medición de obturadores.

### 5.1.6 Ejecución de pruebas de permeabilidad Lugeon

Para la elección de la prueba adecuada en roca, en el proyecto de Jales Sur, se verificó en primera instancia el valor promedio de RQD de la zona que se quería ensayar, esto debido a que, en términos generales, se realizaron pruebas de tipo Lugeon en donde el valor de RQD fuese mayor al 70 % y en caso contrario, se aplicó el ensaye de tipo Lefranc de carga constante.

En el proyecto se realizaron 20 pruebas de permeabilidad en el macizo rocoso y, en todos los barrenos, se realizó la perforación para la prueba Lugeon con diámetro HQ y se utilizó agua limpia con PH neutro para evitar la erosión o taponamiento de las discontinuidades de la roca y para evitar cualquier rastro de fluido de perforación en las paredes. En todos los casos, para el proyecto de Jales Sur, se realizaron las pruebas tipo Lugeon al final de la perforación.

Para la ejecución de las pruebas se tomó como referencia el procedimiento para la ejecución de la prueba Lugeon realizado por la CFE (2015), donde se menciona que el ensayo consiste básicamente en inyectar agua a una presión constante de 1 MPa (10 kp/cm<sup>2</sup>) en un tramo obturando de sondeo durante 10 minutos y durante el trascurso del ensayo se va midiendo la admisión de agua, además, la presión se va aplicando en escalones de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kp/cm<sup>2</sup> y en cada escalón debe mantenerse la presión 10 minutos debiendo alcanzarse siempre la presión de 10 kp/cm<sup>2</sup> salvo en rocas blandas o superficiales en las que podría producirse la fracturación hidráulica.

Como ejecutor y supervisor de las pruebas Lugeon realicé las siguientes actividades:

- Fui el encargado del registro y realicé la descripción de la litología del barreno con ayuda de la exploración previa, en el registro se mostró la recuperación, el RQD, si existe o no el nivel freático y la evolución del nivel de agua de la perforación, ya que dichos elementos



son la base para determinar la longitud del tramo de prueba, la presión inicial, los requerimientos de la misma y en general para prevenir inconvenientes y tomar decisiones pertinentes durante la ejecución de la prueba (Figura 5.8).

- Verifiqué que al iniciar la prueba se registraran los datos generales en el formato recomendado, instalar el equipo indicado y el sistema del obturador neumático (inflado a la presión recomendada por el fabricante) y que se contara con los espacios adecuados para realizar las maniobras correspondientes a la perforación, muestreo y tendido de herramienta.
- Realicé la verificación del material necesario para realizar la prueba (obturadores, mangueras, bombas de agua, tuberías, gas para obturadores, ademe, etc.).
- Registré los intervalos de las corridas de perforación, las profundidades de la prueba, la carga de agua, el volumen utilizado, el tiempo y las mediciones necesarias.



Figura 5.8 a) Medición de profundidad del barreno para evitar azolve/ b) Registro de lecturas.

## 5.2 Instrumentación geotécnica

Para el proyecto Jales Sur el objetivo principal de la instrumentación fue el de obtener información confiable y oportuna del comportamiento de estructuras y depósitos de suelo mediante la colocación y lectura de instrumentos de medición, así como de la interpretación de los datos obtenidos, también menciona los siguientes objetivos particulares:

1. Conocer las condiciones iniciales del sitio (p. ej. estado de esfuerzos y presión de poro).
2. Medir propiedades hidráulicas y mecánicas in situ (p. ej. permeabilidad, compresibilidad y resistencia).
3. Monitorear las diversas etapas durante la construcción.
4. Verificar la calidad de la construcción.
5. Verificar las hipótesis de diseño. La instrumentación puede revelar la necesidad de modificar el diseño.



6. Conocer las condiciones de seguridad. La instrumentación permite conocer en todo momento las condiciones de seguridad de la obra, incluyendo aquellas inesperadas, como sismos y avenidas extraordinarias. Asimismo, la instrumentación proporciona una alerta para impedir fallas, ofrece el tiempo de evacuación y posibilita la implementación de las acciones correctivas.
7. Proporcionar información que sustente una protección o defensa legal. La instrumentación aporta las evidencias para una defensa legal sobre posibles daños ocasionados a estructuras adyacentes.
8. Efectuar monitoreo a largo plazo. La instrumentación permite monitorear el comportamiento de una presa durante toda su vida de servicio.

Para el proyecto de Jales Sur se instalaron PCV y pozos de observación, las actividades particulares y su metodología se detallan a continuación.

### 5.2.1 Instalación de Piezómetros de Cuerda Vibrante.

Para el caso del proyecto en cuestión se instalaron 54 sensores de Piezómetros de Cuerda Vibrante (PCV), todos los piezómetros instalados fueron de la marca *RST Instruments* como se muestra en la Figura 5.9. Se instalaron este tipo de piezómetros debido a que tienen una gran estabilidad en periodos largos de tiempo (más de 10 años), puede automatizarse la bahía de instrumentación para realizar los monitoreos a distancia y que puede tomar lecturas de presiones negativas (algunos jales tienden a tener reacciones exotérmicas que provocan lecturas negativas).



Figura 5.9 Sensor piezométrico RST modelo VW-2100-0.7. RST Instrumens Ltd (Tomado de: <https://rstinstruments.com/product/vibrating-wire-piezometer/>).

Previo a la instalación de los piezómetros se definió y registró con exactitud la ubicación de los instrumentos. Es importante señalar que para este tipo de piezómetros, la información mostrada por cada sensor está en función de parámetros y constantes preestablecidas por el fabricante, por lo que se debe revisar la integridad y el buen funcionamiento de cada instrumento, para lo cual, los piezómetros se sometieron a pruebas de funcionamiento que consisten en comparar las presiones que arroja el sensor contra las registradas con un manómetro patrón en una cámara de presión (Figura 5.10).



Figura 5.10 Verificación y registro de lecturas para los PCV.

Las especificaciones para la instalación de estos instrumentos fueron emitidas por el diseñador después de la ejecución de los sondeos de exploración y fueron plasmadas en un memorándum y un plano de ubicación. Después de contar con estas especificaciones fui el encargado de la instalación de cada uno de los piezómetros de cuerda vibrante y, para esto, realicé las siguientes actividades:

- Verifiqué la preparación del barreno, es decir que no tuviera rastros de fluidos de perforación y que se encontrara a la profundidad establecida para la instalación de todos los piezómetros de cuerda vibrante (se deja un espacio en el fondo del barreno de aproximadamente 1 m para el azolve).
- Aseguré que la colocación y posición de los cables y sensores estuviera en la posición correcta previo al vaciado de la lechada que selló el barreno.
- Registré las lecturas de los sensores antes, durante y después de la instalación para monitorear el cambio de presión en la etapa de vaciado y fraguado de la lechada.
- Registré la ubicación exacta y los datos de cada sensor, así como también tomé la evidencia de cada uno de los sensores previo a su instalación.



Figura 5.11 Datos y evidencia de piezómetro de cuerda vibrante antes de ser instalado.

- Corroboré los datos obtenidos durante la etapa de exploración para saber cuáles son los materiales que se encuentran a esas profundidades.
- Verifiqué que se encuentre toda la herramienta y material necesario para realizar el barreno (barras de perforación, tubos necesarios, coples, etc.) e instalación de los PCV, además de verificar la calidad de la misma.
- Registré los materiales utilizados, las cantidades de materiales para instalación, las profundidades y cualquier anomalía con respecto a la perforación o instalación.
- Verifiqué el funcionamiento de los equipos en todo momento durante la instalación (Figura 5.12).
- Aseguré que la máquina perforadora y la sarta de barras se encuentren niveladas y verticales antes de comenzar el barreno.

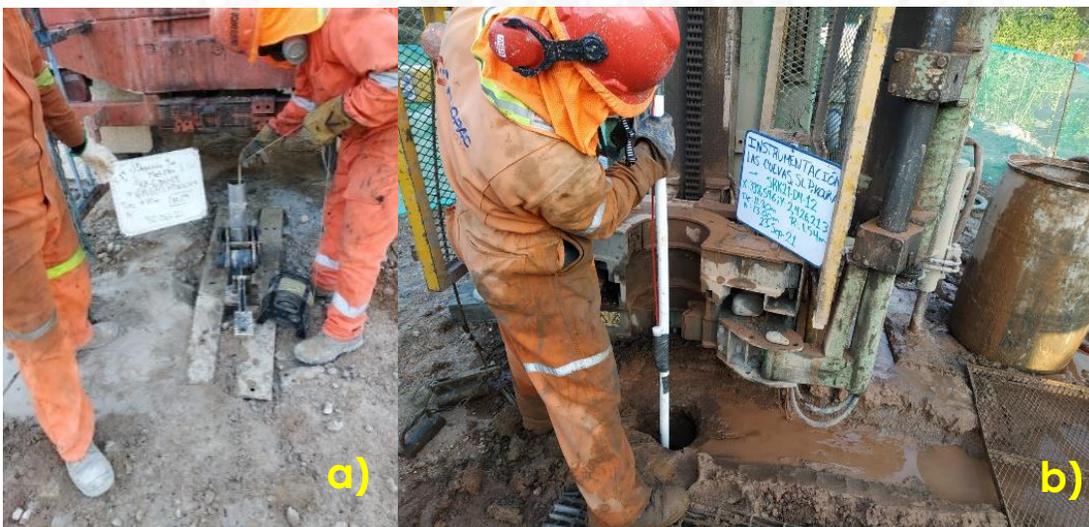


Figura 5.12 a) Medición de azolve en el barreno. / b) Instalación del piezómetro de cuerda vibrante en el barreno.



## 5.2.2 Instalación de pozos de observación

Para la instalación de estos tubos en el proyecto Jales Sur se instalaron 8 pozos de observación y se requirió una perforación de 5 a 10 cm de diámetro para poder introducir el tubo de observación protegido con una funda de polietileno o un tubo metálico (cuya función es evitar que el filtro se contamine por la maniobra). La instalación de los pozos de observación fue definida por el equipo de diseño para poder monitorear algún cambio en el comportamiento del flujo del agua para los jales. Es importante mencionar que no se encontró en ninguna perforación el nivel freático.

Mis responsabilidades y actividades como supervisor para la instalación de pozos de observación en el proyecto de Jales Sur fueron las siguientes:

- Verifiqué la ubicación exacta de cada barreno previo a la instalación del pozo de observación.
- Registré los datos obtenidos durante la etapa de exploración para saber cuáles son los materiales que se encuentran a esas profundidades.
- Verifiqué que se encontrara toda la herramienta necesaria para realizar el barreno (barras de perforación, tubos necesarios, coples, etc.) y la instalación del pozo de observación (tuberías, arenas para filtro, pellets de bentonita, etc.), además de verificar la calidad de todos los materiales.
- Registré los materiales utilizados, las cantidades de materiales para instalación, las profundidades y cualquier anomalía con respecto a la perforación o instalación.
- Aseguré que la máquina perforadora y la sarta de barras se encontraran niveladas y verticales antes de comenzar la barrenación.



Figura 5.13 Instalación de tubería para pozos de observación.



## 6. RESULTADOS

### 6.1 Exploración geotécnica

#### 6.1.1 Sondeos SPT

Para cada uno de los 39 sondeos SPT ejecutados en el proyecto de "Jales Sur" se realizaron los registros de campo en donde fueron plasmados todos los datos, descripciones y valores resultantes durante las pruebas y, con base en toda la información mostrada en los registros, se pudieron obtener los perfiles estratigráficos donde se muestra la resistencia a la penetración de los jales de cada uno de los sondeos. Los registros de campo (Figura 6.1) y los perfiles estratigráficos (Figura 6.2) de los sondeos SPT son de vital importancia para observar de manera gráfica el comportamiento físico y mecánico de los materiales encontrados en cada uno de los sondeos.

Muestra	Profundidad (m)		Recuperación (cm)	RQD %	Número de golpes				Rec Golpes	Descripción
	De	A			15 cm	15 cm	15 cm	15 cm		
5	2.40	3.00	39	-	28	16	18	22	34	Gravas y arenas de caliza color gris y limo color blanco de tono amarillo de compacidad densa
6	3.00	3.60	44	-	17	13	19	22	32	Arcilla de color café, plasticidad alta, presenta grumos de cal de 0.5 cm, consistencia dura y alta RAES.
7	3.60	4.20	44	-	9	8	7	7	15	Arcilla de color café, plasticidad alta, presenta grumos de cal de tamaño grava fina, consistencia media y media RAES.
8	4.20	4.80	34	-	4	4	3	5	7	Arcilla de color café, plasticidad alta, presenta grumos de cal de tamaño arena gruesa y grava fina, consistencia firme y alta RAES.
9	4.80	5.40	19	-	5	4	3	4	7	Arcilla de color café, plasticidad alta, presenta grumos de cal de tamaño arena fina y grava fina, consistencia firme y alta RAES.

Figura 6.1 Registro de campo.

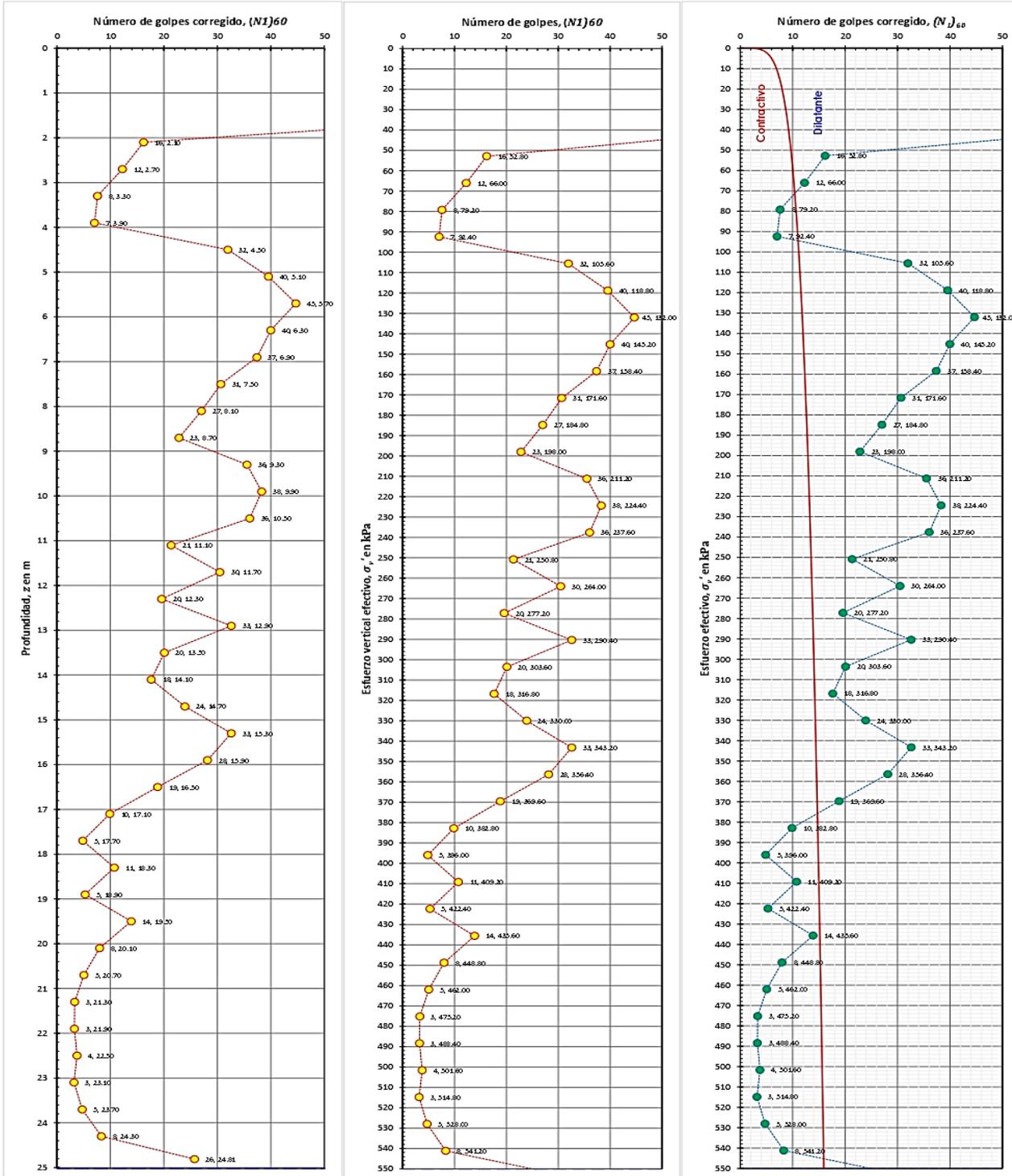


Figura 6.2 Perfil estratigráfico para SPT.

Estos registros y perfiles estratigráficos de sondeos SPT son complementados con los datos y resultados que se obtienen en la fase de pruebas y ensayos de laboratorio después de determinar las propiedades índice de cada una de las muestras.



### 6.1.2 Sondeos CPTu

Posterior a la ejecución de los 54 sondeos CPTu, se realizó el procesamiento de los datos y la obtención de perfiles estratigráficos para el comportamiento de los jales en cada sondeo, estos perfiles se realizan a partir de las diversas correlaciones que existen para los sondeos CPTu y, de manera general, en estos perfiles se debe establecer lo siguiente:

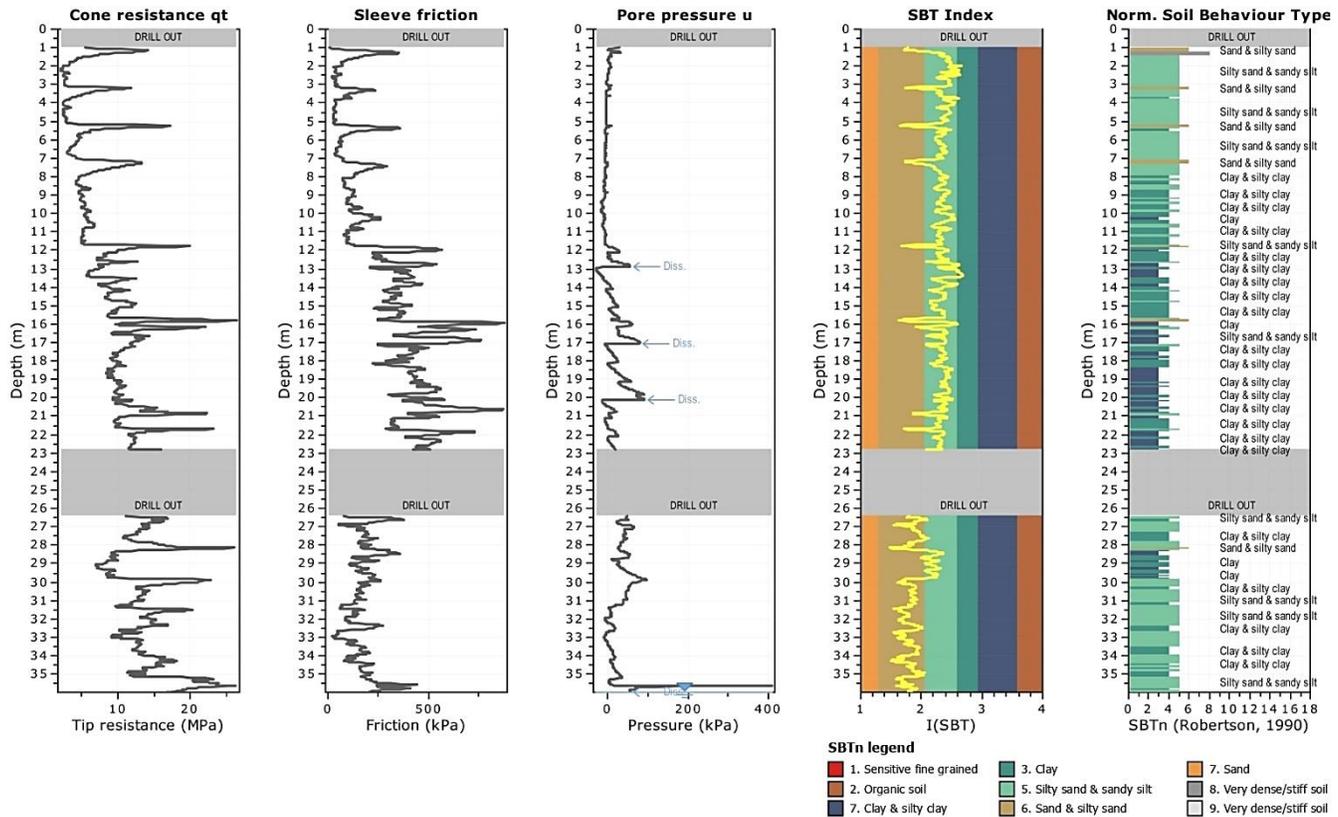
- Profundidad excavada en la superficie para obtener profundidades y datos precisos del sondeo.
- Profundidad de las disipaciones.
- Coordenadas del sondeo.
- Operador del sondeo.

Para los sondeos CPTu se obtuvieron datos en formato .csv al finalizar cada uno de los sondeos, en estos se incluyeron las mediciones cada 2 cm de la resistencia de punta  $q_c$ , fricción de fuste  $f_s$ , presión de poro  $u$  y la inclinación de las barras  $i$ ; estos datos se pueden procesar mediante diversos softwares, uno de ellos es *CPeT-IT*, el cual permite obtener un perfil estratigráfico y la realización de correcciones de los datos obtenidos en campo. Un ejemplo de un perfil procesado para un sondeo CPT es el que se muestra en la Figura 6.3, el cual corresponde a un sondeo realizado en jal en el Depósito 3, se observan los perfiles de la resistencia, fricción y presión de poro, además de un perfil estratigráfico donde se ilustran los diferentes materiales hallados y su profundidad obtenido por la correlación de Robertson (1990). Para este sondeo en específico se realizaron 4 (cuatro) disipaciones en las zonas saturadas.



Project: Met Mex - Depósito Sur  
Location: Torreón, Coahuila, México

Cone Type: I-CFXYP100-10  
Cone Operator: EIT



CPeT-IT v.3.5.1.8 - CPTU data presentation & interpretation software - Report created on: 17-Dec-20, 11:07:31 AM  
Project file: C:\Users\User\Desktop\arostas\KP-J4-CPT\kp-j4-cpt-09\_COMPLETO\KP-J4-CPT-09\_COMPLETO.cpt

Figura 6.3 Perfil obtenido a partir del hincado del piezocono.

### 6.1.3 Sondeos en roca

Con la información obtenida en campo se realizó el registro de campo y el perfil estratigráfico de la sección explorada mediante el muestreo con Barril HQ3, en esta sección se describió la clasificación geológica, la profundidad, la recuperación y el índice de calidad de roca. Un ejemplo del registro de perforación se puede apreciar en la Figura 6.4 y un ejemplo de perfil de sondeo en roca se observa en Figura 6.5.



**Proyecto:** Exploración Geotécnica Depósito Sur  
**Localización:** Torreón, Coahuila  
**SONDEO:** KP-J2-8H-09  
**Operador:** Guillermo Rodríguez  
**Supervisor:** Crispín Martínez Cortés  
**Equipo:** Acker II  
**Bomba:** Mayno

**Fecha de inicio:** 06/01/2021  
**Fecha de finalización:** 16/01/2021  
**Altura del NAF:** - m  
**Profundidad proyectada:** 65.00 m  
**Profundidad alcanzada:** 50.00 m  
**Ademe:** - m  
**Coordenada UTM (X):** 656,037.00 m E  
**Coordenada UTM (Y):** 2,822,195.00 m N

Muestra	Profundidad (m)		Recuperación (cm)	RQD %	Número de golpes				Rec Golpes	Descripción
	De	A			15 cm	15 cm	15 cm	15 cm		
78	46.20	46.67	31	-	18	36	40	50/02	76	En la parte superior hay arcilla café, presenta grumos de cal de tamaño gravas finas, presenta gravas finas, consistencia dura. En la parte inferior fragmentos de caliza con tamaño de 2cm a finos.
79	46.67	47.67	40	0	Avance	-	-	-	HQ	Roca caliza color en fragmentos angulares de diversos tamaños de 10cm (boleos), hasta los 2cm, calidad de roca, familias de fracturas de 45° y 68° (Aluvión).
80	47.67	49.40	80	0	Avance	-	-	-	HQ	Fragmentos de roca caliza, color gris de 8cm de diámetro hasta 2cm, se aprecian vetillas de 2mm, rellenas de carbonato (aluvión)
81	49.40	50.00	60	96	Avance	-	-	-	HQ	Roca caliza color gris, presenta 2 fracturas de 65° y 28°, cada 20cm, las cuales presentan una alteración calcárea. La textura de la roca es fina, con vetillas rellenas de carbonatos, el ángulo de la vetilla es 65° y 27°, hay fracturas recristalizadas de calcita.

Figura 6.4 Ejemplo de registro para sondeo de perforación en roca.

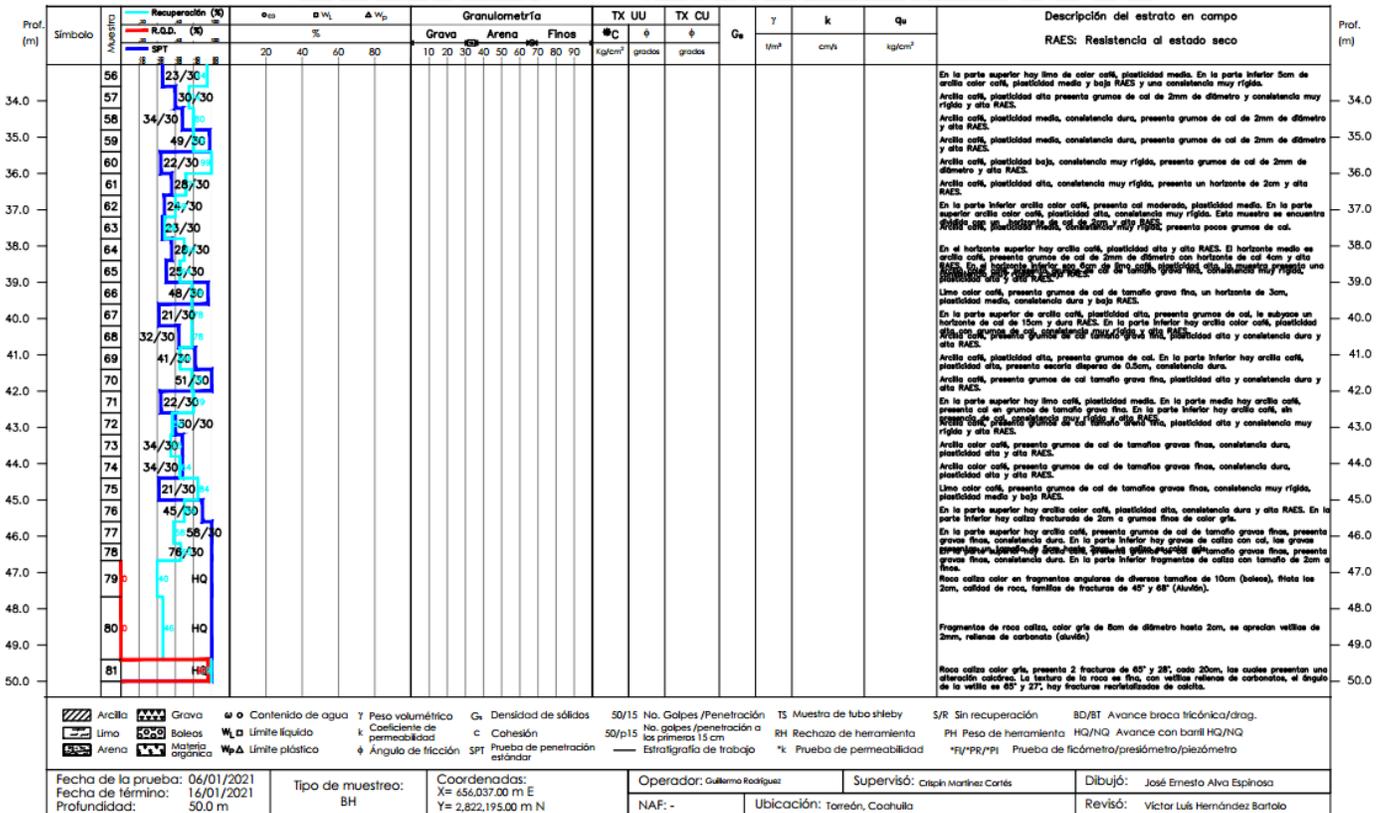


Figura 6.5 Perfil de sondeo en roca.



#### 6.1.4 Pruebas Lefranc

La ejecución de las pruebas fue acompañada mediante una sonda piezométrica marca RST para la toma de lecturas de carga hidráulica, además, el gasto de infiltración durante la ejecución de la prueba fue cuantificado utilizando un medidor de flujo electrónico marca IZAR, con lo cual se tuvo una mayor certeza en la medición del gasto infiltrado durante la prueba. Los resultados de permeabilidad características de los suelos se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Valores típicos de permeabilidad según el tipo de suelo, González de Vallejo (2002).

Tipo de suelo	Coefficientes k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geq 1$
Grava uniforme (GP)	0.2–1
Grava bien graduada (GW)	0.05 – 0.3
Arena uniforme (SP)	$5 \times 10^{-3} - 0.2$
Arena bien graduada (SW)	$10^{-3} - 0.1$
Arena limosa (SM)	$10^{-3} - 5 \times 10^{-3}$
Arena arcillosa (SC)	$10^{-4} - 10^{-3}$
Limo de baja plasticidad (ML)	$5 \times 10^{-5} - 10^{-4}$
Arcillas de baja plasticidad (CL)	$10^{-5} - 10^{-8}$

Los resultados de las pruebas de permeabilidad realizados en los jales fueron del orden de  $9.13 \times 10^{-6}$  a  $3.52 \times 10^{-6}$  cm/s, es decir, valores de permeabilidad baja, según lo indica la Tabla 6.1, de clasificación de permeabilidad y la clasificación de acuerdo con el tipo de material predominante corresponde a arcillas de baja plasticidad. Mientras que los resultados aplicados al material aluvión fueron del orden de arena uniforme como lo muestra la Figura 6.6.



Escalon	Tiempo s	$\Delta$ Tiempo s	Volumen $\text{cm}^3$	Nivel del agua ( $H_m$ ) m	Q $\text{cm}^3/\text{s}$	k $\text{cm}/\text{s}$
0	0.00			6.450		
1	60.00	60.00	67700	6.450	1128.333	1.91E-03
2	120.00	60.00	66000	6.450	1100.000	1.86E-03
3	180.00	60.00	71000	6.450	1183.333	2.00E-03
4	240.00	60.00	68000	6.450	1133.333	1.92E-03
5	300.00	60.00	65700	6.450	1095.000	1.85E-03
6	360.00	60.00	62600	6.450	1043.333	1.77E-03
7	420.00	60.00	67600	6.450	1126.667	1.91E-03
8	480.00	60.00	64800	6.450	1080.000	1.83E-03
9	540.00	60.00	66500	6.450	1108.333	1.88E-03
10	600.00	60.00	66500	6.450	1108.333	1.88E-03
11	660.00	60.00	66500	6.450	1108.333	1.88E-03
12	720.00	60.00	67400	6.450	1123.333	1.90E-03
13	780.00	60.00	68100	6.450	1135.000	1.92E-03
14	840.00	60.00	62200	6.450	1036.667	1.76E-03
15	900.00	60.00	65700	6.450	1095.000	1.85E-03

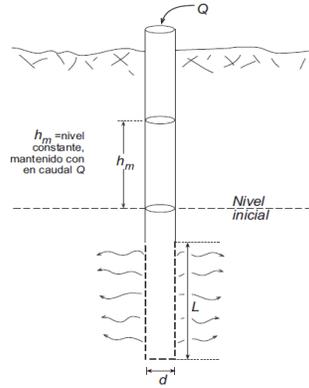
Figura 6.6 Registro para pruebas de permeabilidad Lefrac de carga constante en aluvión.

Los datos fueron capturados en un registro de campo como se muestra en la Figura 6.6 y calculados en el sitio durante la ejecución de la prueba, con la finalidad corregir anomalías o comportamientos fuera de lo esperado, la información recabada fue asentada en hojas de cálculo para la obtención del coeficiente de permeabilidad promedio a lo largo del barreno. En la Figura 6.7 se observa un ejemplo de la gráfica del comportamiento de la prueba Lefranc, la recta plasmada en la hoja de cálculo presenta un comportamiento uniforme que hace referencia a la poca o nula perturbación durante la ejecución de la prueba.



ENSAYOS DE PERMEABILIDAD LEFRANC CARGA CONSTANTE. DATOS DE CAMPO			
CLIENTE:	Grupo Peñoles		
TRAMO:	KP-J2-PT-01		
ENSAYO:	LEFRANC CTE. DE 10.0 A 15.00 M	FECHA:	27/02/2021
MATERIAL:	LIMO CAFÉ ROJIZO DE CONSISTENCIA PLÁSTICA "JAROSITA"		
UG	N30		
Diámetro de la entubación (mm)	70.00	L = Pf - Pi (cm)	500.00
Diámetro interior de tubería (mm), D	65.00	D (cm)	9.00
Nivel Inicial (m), NAF	No existe	L / D	55.56
Altura del revestimiento (m)	0.68	C (cm)	666.92
Profundidad inicio ensayo (m), Pi	10.00	hm (m)	10.68
Profundidad fin de ensayo (m), Pf	15.00	k promedio (cm/s)	1.4333E-03

Anotar los datos solicitados tanto en la gráfica como en sus correspondientes casillas y en sus correspondientes unidades. Todos los datos se tomaran desde cota del terreno.



Jimenez Salas, (1981)

$$K = \frac{Q}{C * h_m}$$

Para cualquier caso:

$$C = \frac{2 \pi L}{\ln \left( \frac{L}{d} + \sqrt{\left( \frac{L}{d} \right)^2 + 1} \right)}$$

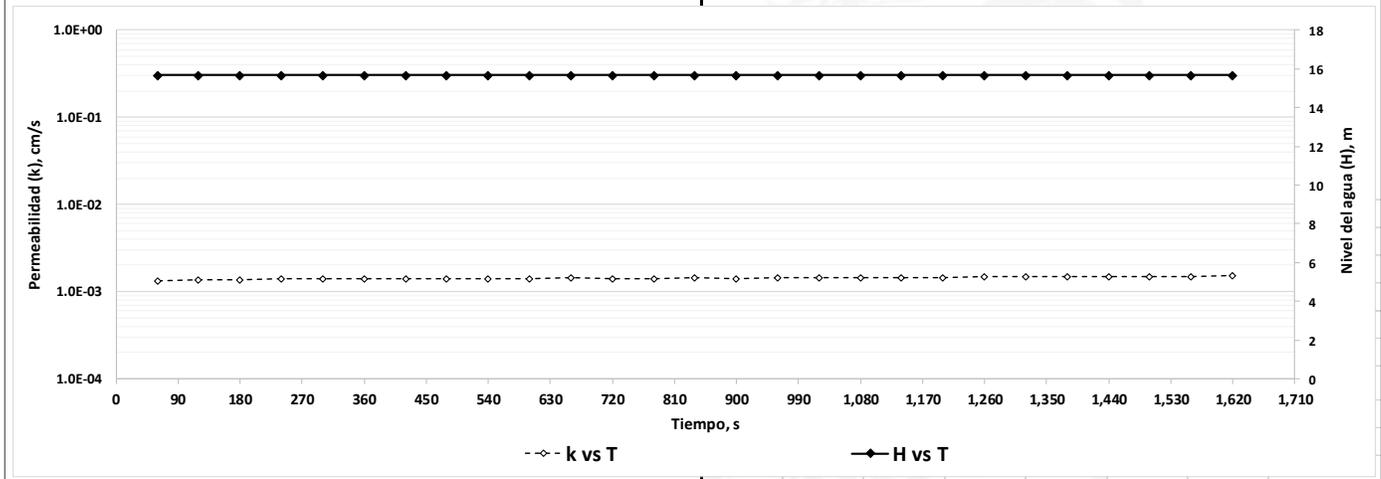


Figura 6.7 Registro de prueba de permeabilidad Lefranc para jal fino.

Los resultados de las pruebas de permeabilidad confirmaron el comportamiento de los materiales en el jal y en la cimentación del terreno natural, en donde se observó que los jales que se encuentran en Jales Sur tienen permeabilidades muy bajas y tienen comportamiento de arcillas o limos, además de que se observó un estrato de entre 0.5 y hasta 5 m conformado de material aluvial por debajo de todos los depósitos con una alta permeabilidad. Estos resultados ayudaron a generar un modelo del flujo del agua de los depósitos.

### 6.1.5 Pruebas Lugeon

Como se mencionó en los capítulos anteriores, antes de la ejecución de la prueba fue necesario llevar el registro y control de las profundidades de la recámara que será ensayada, además de haber realizado la descripción de la litología encontrada en esta profundidad; durante la ejecución de las pruebas Lugeon se va registrando cada una de las lecturas en el periodo ascendente y descendente, estas lecturas posteriormente nos servirán para el cálculo de las presiones y la interpretación de los resultados de la prueba Lugeon.

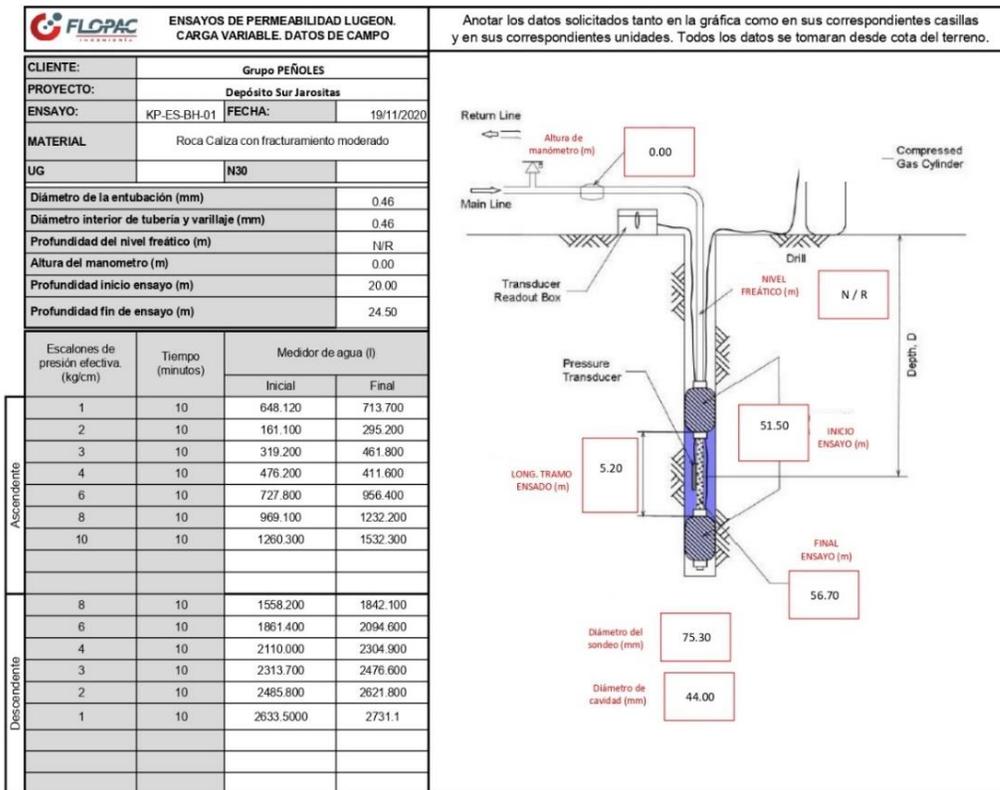


Figura 6.8 Registro para prueba Lugeon.

Con los datos obtenidos a partir del registro de campo para la prueba se realiza en gabinete el procesamiento y la interpretación de la información, por lo cual, se grafican los resultados de la etapa ascendente y descendente (Figura 6.9) para poder realizar una interpretación posterior.

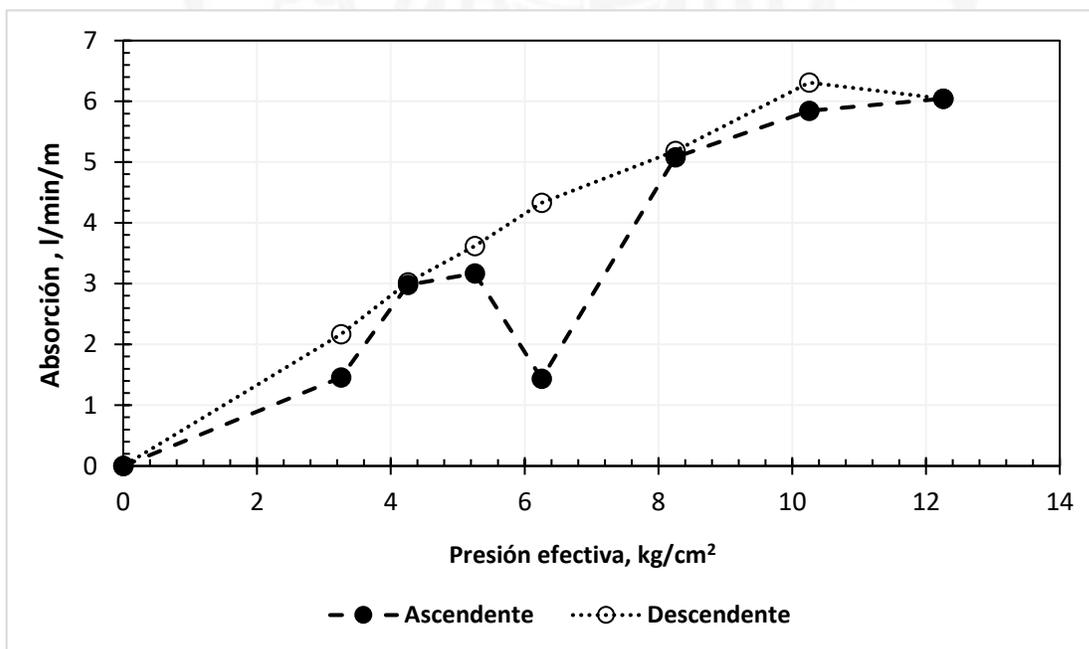


Figura 6.9 Gráfica de lecturas ascendentes y descendentes.



Tabla 6.2 Tabla con el cálculo del valor Lugeon y la clasificación del macizo rocoso.

Etapa	Corrida	P efectiva	Absorción	Valor Lugeon	Clasificación del macizo (CFE, 2015)
		kg/cm <sup>2</sup>	l/min/m		
Ascendentes	1	3.26	1.46	4.48	Impermeable
	2	4.26	2.98	7.00	Impermeable
	3	5.26	3.17	6.03	Poco permeable
	4	6.26	1.44	2.30	Impermeable
	5	8.26	5.08	6.15	Poco permeable
	6	10.26	5.85	5.70	Poco permeable
	7	12.26	6.04	4.93	Poco permeable
Descendente	6	10.26	6.31	6.15	Poco permeable
	5	8.26	5.18	6.28	Poco permeable
	4	6.26	4.33	6.92	Poco permeable
	3	5.26	3.62	6.89	Poco permeable
	2	4.26	3.02	7.10	Poco permeable
	1	3.26	2.17	6.66	Impermeable

De la prueba Lugeon mostrada como ejemplo, se observa que el material es poco permeable, según la clasificación del manual "Ejecución para pruebas tipo Lugeon" (CFE, 2015).

De manera general, se verificó que las pruebas Lugeon realizadas en este proyecto en la roca sana (que regularmente se encuentra entre 5 y 10 m de profundidad después del contacto jal-cimentación) tiene RQD por encima de 70% y tiene permeabilidades bajas.

## 6.2 Instrumentación geotécnica

### 6.2.1 Piezómetros de Cuerda Vibrante

Después de la instalación de los piezómetros de cuerda vibrante en los sondeos establecidos por el equipo de ingeniería, se debe de tomar una lectura diaria y registrarla en el formato de cálculo de presiones, donde se observan las generalidades de cada uno de los sondeos y sensores, además, como resultado también se obtienen las gráficas de las presiones de poro obtenidas cada día que se tomó la lectura (Figura 6.10), es decir, un registro histórico de las presiones de poro que muestran el comportamiento de la presión a través del tiempo.

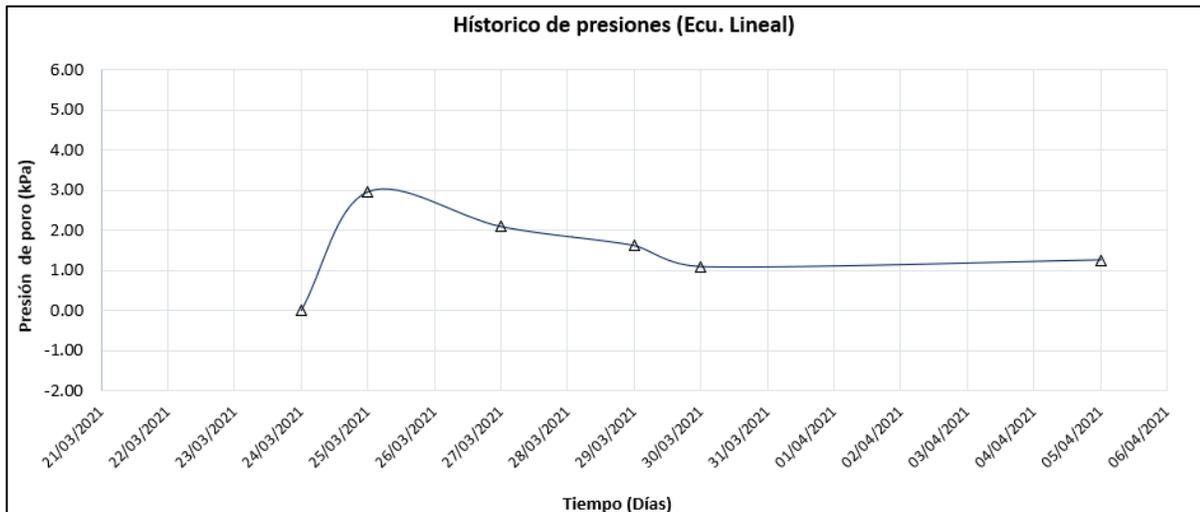


Figura 6.10 Evolución de la presión de poro de un sensor instalado en jal.

Uno de los objetivos de la instalación de los PCV en el proyecto “Jales Sur” era conocer la trayectoria de la Línea Superior de Corriente dentro del depósito de jales y verificar el nivel freático de la cimentación. Como resultado, se instalaron 54 PCV en 22 barrenos en los cuales fue posible constatar que existen zonas y estratos saturados dentro de los depósitos de jales, los cuales no necesariamente obedecen a una línea superior de corriente, si no, a zonas saturadas producto del acarreo del jal con un alto contenido de agua o también a una falta de oreado y compactación del jal al momento de ser depositado.

### 6.2.2 Pozos de observación

Para el caso de los pozos de observación, también se obtiene como resultado la toma de lecturas con ayuda de una sonda eléctrica de la marca RST, estas lecturas se registran de manera manual en hojas de monitoreo para registrar los cambios en los niveles freáticos o, para el caso de este proyecto, la presencia de algún nivel superior de corriente.

Para el proyecto de “Jales Sur” no se registró ninguna profundidad de nivel de agua dentro del depósito y los niveles freáticos en esta zona de la ciudad de Torreón se registran de hasta 60 m de profundidad, por lo que los pozos de observación instalados servirán para monitorear los depósitos en caso de alguna lluvia torrencial.

### 6.3 Generación del Sección geológico-geotécnica en Depósito 1

La información procesada obtenida durante la etapa de exploración en el proyecto de Jales Sur se utilizó para la generación de secciones en los cinco depósitos, las cuales tienen como finalidad observar de manera conjunta las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los depósitos, además, se pueden visualizar las profundidades, geometría y ubicaciones de los sondeos e instrumentación de manera gráfica. Estas secciones se utilizan posteriormente por los equipos de ingeniería para modelar y analizar los depósitos de jales y así identificar posibles fallas o zonas de inestabilidad y para poder realizar el diseño para el recrecimiento de cada uno de los depósitos.



Con fin ilustrativo en este informe, se procesó la información de los siete sondeos (ZS-D1-01 al ZS-D1-07) que se ubican en la sección principal del Depósito 1 (Figura 6.11) en la Sección geológico-geotécnica D1-S1, que se encuentra como anexo al final de este informe.

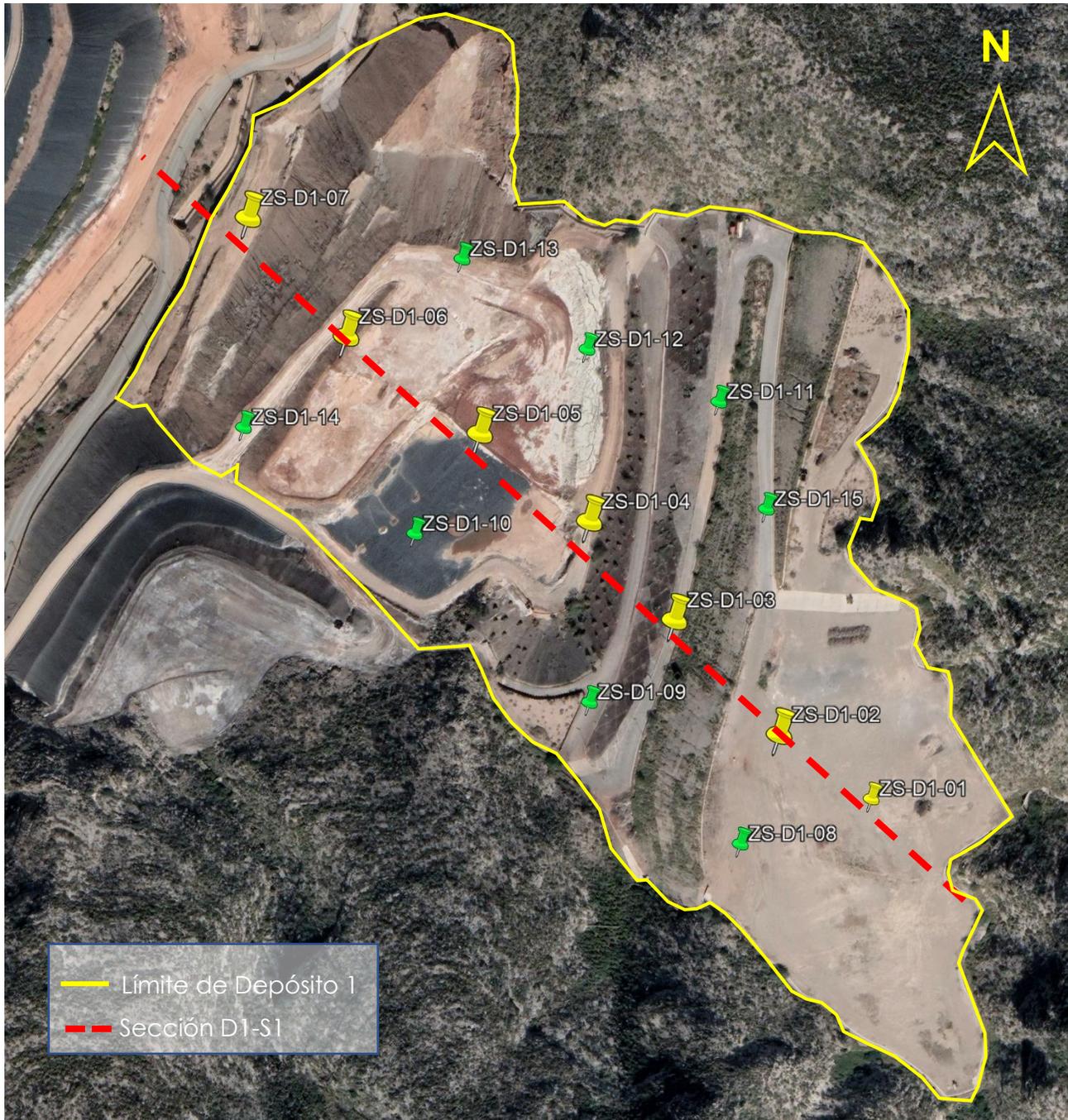


Figura 6.11 Ubicación de la Sección D1-S1 en Depósito 1.



### 6.3.1 Ubicación de perfiles geotécnicos

En la Sección geológico-geotécnica D1-S1 se plasman las propiedades físicas de los materiales, la litología del desplante del depósito, los resultados obtenidos de los sondeos SPT ( $N_{SPT}$ ) y CPTu ( $q_u$ ), la ubicación de las pruebas de permeabilidad, la profundidad en la que fueron tomadas las muestras inalteradas y la ubicación de la instrumentación instalada. Los perfiles geotécnicos de cada sondeo se muestran en el Anexo 2.

Los límites de consistencia, la clasificación SUCS y los valores de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se obtuvieron por laboratorio durante la etapa de exploración y son mostrados de manera complementaria en la Sección geológico-geotécnica D1-S1.

Como se menciona en párrafos anteriores, los sondeos de exploración realizados para generar esta sección fueron siete, de los cuales, las coordenadas, profundidades de exploración, profundidades de ejecución de pruebas y muestreo inalterado se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Coordenadas y profundidades de cada sondeo de la Sección D1-S1.

COORDENADAS UTM				PROFUNDIDADES DE EXPLORACIÓN			PROFUNDIDADES PRUEBAS DE PERMEABILIDAD Y MUESTREO INALTERADO				
Barreno	X	Y	Z (msnm)	SPT	CPTu	Sondeos en roca	Prueba Lugeon	Prueba Lefranc		Muestra inalterada	
ZS-D1-01	656092	2822160	1229.1	43.25 m	35.79 m	43.25-58 m	47-52 m	10-15 m	30-35 m	4 m	25 m
ZS-D1-02	656049	2822185	1229	-	56.3 m	-	-	-	-	15 m	
ZS-D1-03	656001	2822236	1213.82	50 m	27.8 m	50-53.5 m	-	-	-	22 m	
ZS-D1-04	655962	2822280	1206.42	49.2	38 m	49.2-61 m	56-61 m	10-15 m	40-45 m	20 m	35 m
ZS-D1-05	655912	2822319	1199.48	-	32.3 m	-	-	-	-	-	
ZS-D1-06	655851	2822362	1200	44.5 m	17.8 m	44.5-49.8 m	45-49.8 m	5-10 m	35-40 m	30 m	
ZS-D1-07	655806	2822415	1164	11.45 m	6.8-11 m	11.45-16.45 m	-	-	-	7 m	

Así mismo, se instalaron 9 piezómetros de cuerda vibrante distribuidos en los barrenos ZS-D1-01, ZS-D1-04 y ZS-D1-07 y, además, se instaló un pozo de observación en el barreno ZS-D1-06 para monitorear el límite superior de corriente. Las profundidades y coordenadas se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Coordenadas y profundidades de instrumentación de la Sección D1-S1.

COORDENADAS UTM				PROFUNDIDADES DE INSTRUMENTACIÓN				
Barreno	X	Y	Z (msnm)	Piezómetros de Cuerda Vibrante				Pozos de Observación
ZS-D1-01	656092	2822160	1229.1	12.5 m	22 m	33 m	43.25 m	-
ZS-D1-02	656049	2822185	1229	-	-	-	-	-
ZS-D1-03	656001	2822236	1213.82	-	-	-	-	-
ZS-D1-04	655962	2822280	1206.42	12.5 m	42 m	58 m	-	-
ZS-D1-05	655912	2822319	1199.48	-	-	-	-	-
ZS-D1-06	655851	2822362	1200	-	-	-	-	49.8 m
ZS-D1-07	655806	2822415	1164	5 m	11.45 m	-	-	-



### 6.3.2 Zonificación geológico-geotécnica

En este subcapítulo se explican las unidades determinadas con base en la correlación estratigráfica de las propiedades físicas y mecánicas de los sondeos de exploración y pruebas in situ. Esta zonificación y los parámetros mecánicos de las distintas unidades es fundamental para realizar el análisis de la estabilidad de cada uno de los depósitos de jales y, posteriormente, el diseño del recrecimiento de cada depósito.

Las unidades geológico-geotécnicas obtenidas a partir de la correlación estratigráfica se dividieron de la siguiente manera:

#### 6.3.2.1 Desplante del depósito

- Roca caliza (KaCz): Secuencia del Cretácico Inferior conformada por roca caliza plegada de color gris de la Formación Aurora, con vetas y vetillas de calcita blanca con textura de enrejado, se observan algunas oquedades de entre 0.5 y 2 cm de diámetro rellenas de calcita anaranjada recristalizada, además se hallan bandas de pedernal color negro de hasta 2 cm de espesor. En el Depósito 1 se observan los estratos basculados con *Dip/Dip Direction* de  $210^{\circ}/20^{\circ}$ .
- Aluvión (Qal): Unidad conformada por bloques y gravas subangulosos y subredondeados de caliza color gris en una matriz areno-limosa color amarillo tono café. Se observa contenido de materia orgánica.

#### 6.3.2.2 Unidades de jal y recubrimiento

- Limo arenoso de baja plasticidad (JML): Unidad de jal con un espesor promedio de 25 m conformado por limos arenosos de baja plasticidad de color gris claro tono verde, con un contenido de agua entre 6 y 12%. Se registraron los siguientes límites de consistencia:  $LL=38$  y  $LP=31$ , además se obtuvo una permeabilidad de  $k=5 \times 10^{-5}$  cm/s a partir de las pruebas Lefranc realizadas en esta unidad. Con ayuda de los sondeos SPT se tienen resultados  $N_{SPT}$  de entre 12 y 28 golpes, lo cual corresponde a una consistencia firme a muy firme; con ayuda de los sondeos CPT se obtuvo una resistencia en punta  $q_c$  de entre 15 y 30 MPa y a partir de ensayos de laboratorio se obtuvo el módulo de elasticidad  $E=32$  MPa y una resistencia a la compresión  $q_u$  de entre 0.1 y 0.2 MPa.
- Recubrimiento (RGM): Gravas limosas bien gradadas color gris, subangulosas y angulosas de caliza en una matriz de limo color amarillo tono café. Se observa como probable recubrimiento de espesor promedio de 3.5 m colocado encima de alguna etapa constructiva con el fin de evitar la erosión del jal.
- Arcilla de alta plasticidad (JCH): Unidad de jal con un espesor promedio de 15 m conformada por arcillas de alta plasticidad color café tono rojo, con un contenido de agua de entre 9 y 17%. Se registraron los siguientes límites de consistencia:  $LL=55$  y  $LP=23$ , además se obtuvo una permeabilidad de  $k=3.5 \times 10^{-8}$  cm/s a partir de las pruebas Lefranc realizadas en esta unidad. Con ayuda de los sondeos SPT se tienen resultados  $N_{SPT}$  de entre 10 y 25 golpes, lo cual corresponde a una consistencia firme a muy firme; con ayuda de los



sondeos CPT se obtuvo una resistencia en punta  $q_c$  de entre 15 y 20 MPa y a partir de ensayos de laboratorio se obtuvo el módulo de elasticidad  $E=25$  MPa y una resistencia a la compresión  $q_u$  de entre 0.08 y 0.15 MPa.

A continuación, la Tabla 6.5 muestra la clasificación y parámetros de las unidades geológico-geotécnicas definidas, esta tabla también puede consultarse en la Sección geológico-geotécnica D1-S1. Es importante mencionar que algunas de estas unidades se encuentren presentes en los demás depósitos de Zona Sur debido a las características observadas durante la ejecución de sondeos en campo.

Tabla 6.5 Propiedades índice y mecánicas de las zonas geotécnicas Sección D1-S1.

Material	Unidad Geológico-Geotécnico	Clasificación SUCS	K	Nspt	$q_c$ (Mpa)	LL	LP	IP	w (%)	$q_u$ (MPa)	E (Mpa)
Jal	JCH	CH	$3.5 \times 10^{-8}$ cm/s	10-25	15-20	55	23	32	9-17	0.08-0.15	25
	JML	ML	$5 \times 10^{-5}$ cm/s	12-28	15-30	38	31	7	6-12	0.1-0.2	32
Recubrimiento	RGM	GM	$2.5 \times 10^{-3}$ cm/s	50-Rechazo	-	-	-	-	-	0.15-0.3	-
Aluvión	Qal	GW	0.05 – 0.3 cm/s	50-Rechazo	-	-	-	-	-	-	-
Roca de cimentación	KaCz	-	7.10 UL (Unidad Lugeon)	Rechazo	-	-	-	-	-	50-100	-

### 6.3.3 Interpretación de Sección geológico-geotécnica D1-S1

Posterior a la zonificación, se realizó la interpretación de la Sección geológico-geotécnica D1-S1 determinando tres etapas constructivo-metalúrgicas explicadas a continuación:

- Etapa constructiva 1. Considerando que el depósito fue construido con el método de construcción aguas arriba, la etapa de inicio se considera como el bordo iniciador en el pie del Depósito 1, en esta etapa se observa un espesor de aproximadamente 5 m de limo arenoso de la unidad JML (jal limo-arenoso) compactado y con un recubrimiento de 7 m de grava limosa de la unidad RGM. En la figura que se muestra a continuación esta etapa está marcada de color anaranjado.
- Etapa constructiva 2. La segunda etapa es conformada por jal proveniente de la primera etapa de producción metalúrgica y se encuentra la unidad de jal JML, la cual llega hasta



la cota 1205 msnm aproximadamente, es decir se tiene un espesor promedio de 25 m y se extiende hasta la ladera natural en dirección SW. Esta etapa constructiva finaliza con la colocación de material de recubrimiento de la unidad RGM (grava limosa), la cual se colocó para evitar la erosión por lluvia y viento de los jales limo-arenosos colocados aquí. En la siguiente figura esta etapa está marcada de color azul.

- **Etapa constructiva 3.** La tercera etapa (considerada como la más reciente), es en donde se observa el cambio en la producción metalúrgica a jal arcilloso de la unidad determinada como JCH (jal arcilloso), la cual tiene un espesor promedio de 20 m y se extiende hasta la ladera natural. En la figura de abajo se muestra esta etapa con color verde.

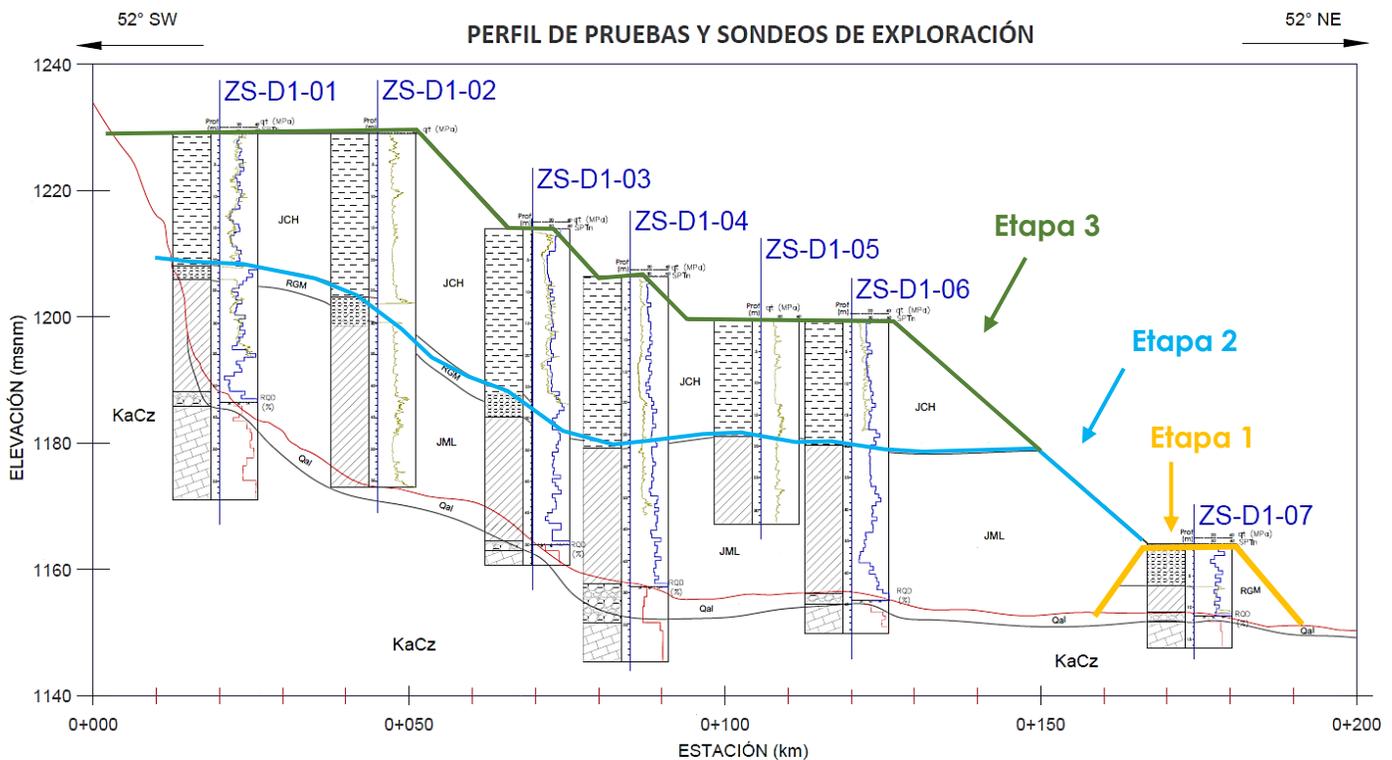


Figura 6.12 Corte D1-S1 con etapas de construcción.

A partir de la inferencia de las tres etapas constructivas, se pueden observar dos tipos de procesos metalúrgicos que dieron como resultado dos tipos diferentes de jal en el Depósito 1, esto puede hacer referencia al mejoramiento de la obtención del concentrado de los minerales, ya que en el jal más reciente se obtiene un tamaño menor de partícula (arcilla), lo cual optimiza el proceso de separación entre concentrado y jal.

Para el momento de finalización del proyecto de exploración e instrumentación no se realizó el recubrimiento de la tercera etapa ni se encontraba en operación el Depósito 1.



## 7. CONCLUSIONES

1. Cada depósito de jales es único en su tipo y deben ser estudiado y comprendido como un caso particular tomando en cuenta su cimentación, las rocas originarias del jal y la zona en donde se encuentra localizado. De ahí la importancia de realizar una completa campaña de exploración e instrumentación para obtener parámetros de los diferentes materiales.
2. Los jales son depósitos de origen antrópico y suelen tener comportamientos no correlacionables con suelos de origen natural debido a su composición física y química, por lo tanto, es imprescindible el comparar los resultados de distintos sondeos para obtener parámetros geotécnicos de manera más precisa.
3. Para todos los proyectos de geotecnia en depósitos de jales es indispensable la integración y comunicación de equipos interdisciplinarios, sobre todo con los equipos de metalurgia y construcción para entender de mejor manera el proceso en el que fueron depositados los jales, ya que eso aporta mucha información para comprender la naturaleza de los materiales almacenados en los depósitos.
4. La toma de lecturas de los instrumentos debe respetar una periodicidad, y debe estar relacionada con la actividad de construcción, eventos climáticos importantes y con la velocidad a la que cambian las lecturas. Demasiadas lecturas sobrecargan la capacidad de procesamiento e interpretación, mientras que muy pocas pueden hacer que se pierdan eventos importantes y evitar que se tomen las medidas oportunas.
5. A partir de los sondeos de exploración y la instrumentación se determinaron cinco unidades geotécnicas para el Depósito 1, las cuales son:
  - i. Roca caliza (KaCz): Secuencia del Cretácico Inferior conformada por roca caliza basculada de color gris de la Formación Aurora con vetas con estratificación *Dip/Dip Direction* de  $210^{\circ}/20^{\circ}$ .
  - ii. Aluvión (Qal): Unidad conformada por bloques y gravas subangulosos y subredondeados de caliza color gris en una matriz areno-limosa color amarillo tono café. Se observa contenido de materia orgánica.
  - iii. Limo arenoso de baja plasticidad (JML): Unidad de jal con un espesor de 25 m conformado por limos arenosos de baja plasticidad de color gris claro tono verde,  $w$  entre 2 y 4%,  $LL=38$ ,  $LP=31$ ,  $k=5 \times 10^{-5}$  cm/s,  $N_{SPT}$  entre 12 y 28 golpes (consistencia firme a muy firme),  $q_c$  de entre 15 y 30 MPa y, a partir de ensayos de laboratorio, se obtuvo  $E=32$  MPa y  $q_u$  de entre 0.1 y 0.2 MPa.
  - iv. Recubrimiento (RGM): Gravas limosas bien gradadas color gris, subangulosas y angulosas de caliza en una matriz de limo color amarillo tono café. Se observa como probable recubrimiento con espesor promedio de 3.5 m colocado encima de alguna etapa constructiva con el fin de evitar alguna erosión del jal.
  - v. Arcilla de alta plasticidad (JCH): Unidad de jal con un espesor promedio de 15 m conformada por arcillas de alta plasticidad color café tono rojo,  $w$  entre 6 y 11%,  $LL=55$ ,  $LP=23$ ,  $k=3.5 \times 10^{-9}$  cm/s,  $N_{SPT}$  entre 10 y 25 golpes (consistencia firme a muy firme),



$q_c$  entre 15 y 20 MPa y, a partir de ensayos de laboratorio, se obtuvo  $E=25$  MPa y  $q_u$  de entre 0.08 y 0.15 MPa.

6. Con base en la zonificación geotécnica del Depósito 1, se pueden inferir las siguientes etapas constructivas:
  - i. Etapa constructiva 1. Corresponde al bordo iniciador en el pie del Depósito 1, en esta etapa se observa un espesor de aproximadamente 5 m de limo arenoso de la unidad JML (jal limo-arenoso) compactado y con un recubrimiento de 7 m de grava limosa de la unidad RGM (grava limosa).
  - ii. Etapa constructiva 2. La segunda etapa es conformada por jal proveniente de la primera etapa de producción metalúrgica y se encuentra la unidad de jal JML (jal limo-arenoso), la cual llega hasta la cota 1205 msnm aproximadamente, es decir se tiene un espesor promedio de 25 m y se extiende hasta la ladera natural en dirección SW. Esta etapa constructiva finaliza con la colocación de material de recubrimiento de la unidad RGM (grava limosa), la cual se colocó para evitar la erosión por lluvia y viento de los jales limo-arenosos colocados aquí.
  - iii. Etapa 3. La tercera etapa (considerada como la más reciente), es en donde se observa el cambio en la producción metalúrgica a jal arcilloso de la unidad determinada como JCH (jal arcilloso), la cual tiene un espesor promedio de 20 m y se extiende hasta la ladera natural.
7. A partir de la inferencia de las tres etapas constructivas en la Sección D1-S1, se pueden observar dos tipos de procesos metalúrgicos que dieron como resultado dos tipos diferentes de jal en el Depósito 1, esto puede hacer referencia al mejoramiento de la obtención del concentrado de los minerales, ya que en el jal más reciente se obtiene un tamaño menor de partícula (arcilla), lo cual optimiza el proceso de separación entre concentrado y jal.
8. Debido a que comúnmente es necesario realizar recrecimientos o sobreelevaciones a los depósitos de jales ya construidos, es de vital importancia evaluar sus condiciones de estabilidad para realizar diseños realistas de cada depósito, debido a que al incrementar el volumen y modificar la geometría de los depósitos se están modificando los esfuerzos de cada estructura.
9. Para la empresa minera propietaria de Zona Sur y de la metalúrgica, es de vital importancia conocer a detalle las propiedades de los jales que se encuentran en cada uno de sus depósitos, ya que, de esta manera, podrán cumplir con los objetivos de realizar un diseño para el recrecimiento seguro de cada una de las estructuras de jal y así continuar con la producción del concentrado y el ciclo de operación de sus minas.



## 8. REFERENCIAS

- ASTM D 2487. (2007). Standar Classification of Soils for Engineering Purposes.
- ASTM D 422. (2008). Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils.
- ASTM D1587. (2012). Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes.
- ASTM D4220-95. (2007). Prácticas para transportar y preservar muestras de suelo.
- ASTM D5778. (2007). Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.
- ASTM, D. (2014). *Contenido de humedad de suelo y rocas*.
- ATSM, D. (2011). *Determinación de Índice a carga puntual de la roca*.
- Bowker, L., & Chambers, D. (2015). *The Risk, Public Liability & Economics of Tailings Storage, Facility Failures*. Earthwork Act.
- Bowles, J. (2012). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Manual*.
- C127, A. (2001). *Density, relative Density*. American Society for.
- C17217. (2017). *Muestreo de concreto fresco*.
- CFE. (2013). *Exploración Directa con Obtención de Muestras del Suelo*. CDMX.
- CFE. (2013). *Muestreo de Suelos con Tubos de Pared Delgada*.
- CFE. (2015). *Realización de Pruebas de Permeabilidad Tipo Lugeon*.
- CFE. (2016). *Elaboración del Informe de una Perforación con Recuperación de Núcleo*.
- Conagua. (2012). *Manual de Mecánica de Suelos*. México, D.F.: SEMARNAT.
- Contreras, F., & Dueñas, J. (2010). *La Minería y la Metalúrgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestros días*. Jaén, España: Diputación de Jaén.
- D2216, A. (2019). *Análisis granulométrico por tamizado*.
- Dunnicliff, J. (1982). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Engineers, U. A. (1992). *Design, Construction and Maintenance of Relief Wells. Engineer Manual*.
- Fowler, B., Rabasca, S., & O'Connor, C. (2012). *Reducing Relief Well Clogging and Pore-Water Pressures Using Natural Groundwater Pressures and a Packer-Purge System. Geotechnical Engineering*.
- Franks, D., Boger, D., Cote, C., & Mulligan, D. (2011). *Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. Res. Policy, 114-122*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
- Guevara, L., Paredes, R., & Toral, J. (2014). *Geotecnia y Cementaciones*. Quito: CAMICON.
- Herbet, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.



- Hu, W., Xin, C., Li, Y., Zheng, Y., Van Asch, T., & McSaveney, M. (2021). Instrumented flume tests on the failure and fluidization of tailings dams induced by rainfall infiltration. *Eng. Geol.*, 294.
- International Society for Rock Mechanics . (1978). Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sel Geomech.*, 319-368.
- Mariano, J. M. (2014). *Propiedades mecánicas de jales para diseño de presas*. Puebla: BUAP.
- Martínez, J., Mendoza, R., Rey, J., Sandoval, S., & Hidalgo, C. (2021). *Characterization of Tailings Dams by Electrical Geophysical*. España: Minerals.
- Min, L., Ming, X., Shimin, L., & Douglas, R. (2020). . In Situ Seismic Investigations for Evaluating Geotechnical Properties and Liquefaction. *Geotech. Geoenviron. Eng*, 146-152.
- Reyes, J. M. (2014). *Propiedades Mecánicas de Jales para Diseño de Presas*. Puebla: BUAP.
- Robertson, P., Powel, J., & Lunne, T. (2009). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 45-52.
- Roctest. (2009). *Instruction manual and catalogs*. Quebec: Saint-Lambert.
- Rodríguez, J., & Martínez, M. (2002). *Sistemas de Instrumentación geotécnica en obras de Ingeniería Civil*. México, D.F.: UNAM.
- SEMARNAT. (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM141-SEMARNAT-2003*. Ciudad de México.
- Sevilla Tendero, J. (2019). *Auditoría de los Sistemas Integrados de Gestión: ISO 9001:2015 14001:2015, ISO 45001:2018*. Madrid: Fundación Confemetal.
- Wei, Z., Yin, J., Wan, L., & Li, G. (2013). Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Manag. Res*, 106–112.
- Wise Uranium Project. (13 de Octubre de 2022). <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Obtenido de Chronology of Major Tailings Dam Failures.



**ANEXO 1 Sección geológico-geotécnica D1-S1**

DATOS GENERALES																
COORDENADAS UTM			PROFUNDIDADES DE EXPLORACIÓN			PROFUNDIDADES PRUEBAS DE PERMEABILIDAD Y MUESTREO INALTERADO				PROFUNDIDADES DE INSTRUMENTACIÓN						
Sondeo	X	Y	Z (msnm)	SPT	CPTu	Sondeos en roca	Prueba Lefranc	Prueba Lugeon	Muestra inalterada	Piezómetros de Cuerda Vibrante			Pozos de Observación			
ZS-D1-01	656092	2822160	1229.1	43.25 m	35.79 m	43.25-58 m	10-15 m	30-35 m	47-52 m	4 m	25 m	12.5 m	22 m	33 m	43.25 m	-
ZS-D1-02	656049	2822185	1229	-	56.3 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZS-D1-03	656001	2822236	1213.82	50 m	27.8 m	50-53.5 m	-	-	22 m	-	-	-	-	-	-	-
ZS-D1-04	655962	2822280	1206.42	49.2	38 m	49.2-61 m	10-15 m	40-45 m	56-61 m	21 m	34 m	12.5 m	42 m	58 m	-	-
ZS-D1-05	655912	2822319	1199.48	-	32.3 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZS-D1-06	655851	2822362	1200	44.5 m	17.8 m	44.5-49.8 m	5-10 m	35-40 m	45-49.8 m	13 m	32 m	-	-	-	-	49.8 m
ZS-D1-07	655806	2822415	1164	11.45 m	6.8-11 m	11.45-16.45 m	-	-	-	3 m	5 m	11.45 m	-	-	-	-

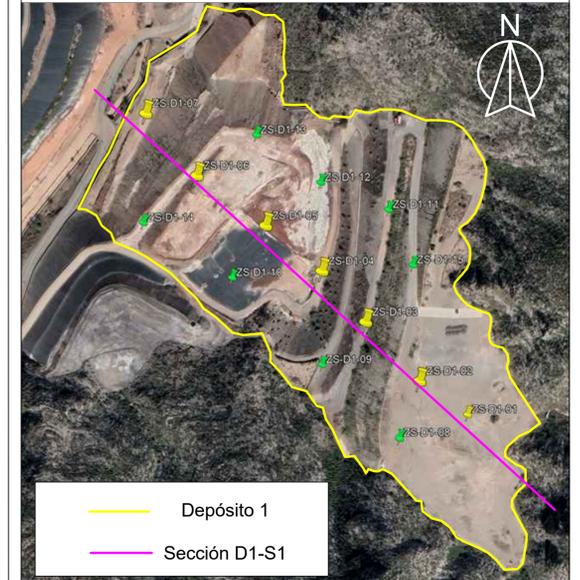
Material	Unidad Geológica-Geotécnica	Símbolo	Clasificación SUCS	Descripción	Permeabilidad k	Número de golpes SPT N <sub>spt</sub>	Resistencia en punta qc (Mpa)	Límites de consistencia LL LP IP	Contenido de agua w (%)	Resistencia a la compresión simple qu (Mpa)	Módulo de elasticidad E (Mpa)
Jal	JCH	[Hatched]	CH	Unidad de jal con un espesor promedio de 15 m conformada por arcillas de alta plasticidad de color café tono rojo.	3.5x10 <sup>-8</sup>	10-25	15-20	55 23 32	9-17	0.08-0.15	25
Jal	JML	[Hatched]	ML	Unidad de jal con un espesor promedio de 25 m conformada por limos arenosos de baja plasticidad de color gris claro tono verde.	5x10 <sup>-5</sup>	12-28	15-30	38 31 7	6-12	0.1-0.2	32
Recubrimiento	RGM	[Hatched]	GM	Gravas limosas bien gradadas color gris, subangulosas y angulosas de caliza en una matriz de limo color amarillo tono café. Se observa como probable recubrimiento colocada encima de alguna etapa constructiva con el fin de evitar alguna erosión del jal.	2.5x10 <sup>-3</sup>	50-Rechazo	-	-	-	0.15-0.3	-
Aluvión	Qal	[Hatched]	GW	Aluvión conformado por bloques y gravas subangulosas y subredondeadas de caliza color gris en una matriz arenolimos color amarillo tono café. Se observa contenido de materia orgánica.	0.05 - 0.3	50-Rechazo	-	-	-	-	-
Roca de cimentación	KaCz	[Hatched]	-	Caliza basculada con Dip/Dip Direction de 210°/20° de color gris con vetas y vetillas de caliza blanca con textura de enrejado; se observan algunas oquedades de entre 0.5 y 2 cm de diámetro rellenas de caliza anaranjada recristalizada, además se hallan bandas de pedernal color negro de hasta 2 cm de espesor.	7.10 UI (Unidad Lugeon)	Rechazo	-	-	-	50-100	-

### Croquis de Localización

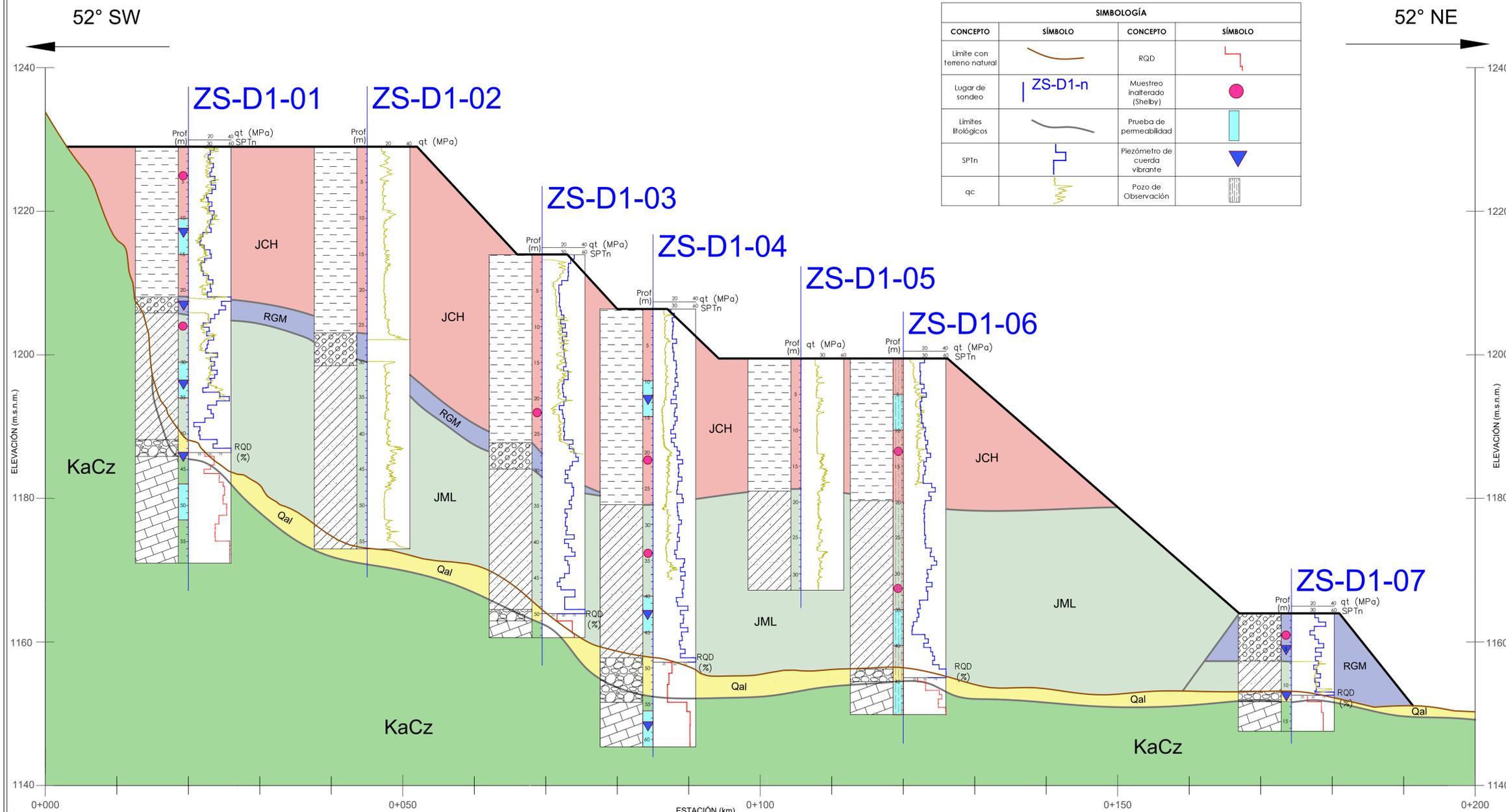


● Lugar de estudio

### Planta del Depósito 1



Notas:  
 \*Los perfiles particulares de cada sondeo se encuentran en el ANEXO 2.  
 \*Los resultados de qu y E fueron obtenidos a partir de ensayos de laboratorio, los cuales no son tema de este informe, solo se tomaron como referencia.  
 \*El nombre del depósito, proyecto y sondeos fueron cambiados con respecto al proyecto original para temas de confidencialidad de la empresa de origen.



SIMBOLOGÍA			
CONCEPTO	SÍMBOLO	CONCEPTO	SÍMBOLO
Límite con terreno natural	[Line]	RQD	[Line]
Lugar de sondeo	ZS-D1-n	Muestreo inalterado (Shelby)	[Dot]
Límites litológicos	[Line]	Prueba de permeabilidad	[Line]
SPTn	[Line]	Piezómetro de cuerda vibrante	[Triangle]
qc	[Line]	Pozo de Observación	[Line]

Título:  
**Sección geológico-geotécnica D1-S1**

Proyecto:  
 "Jales Sur", Torreón, Coahuila

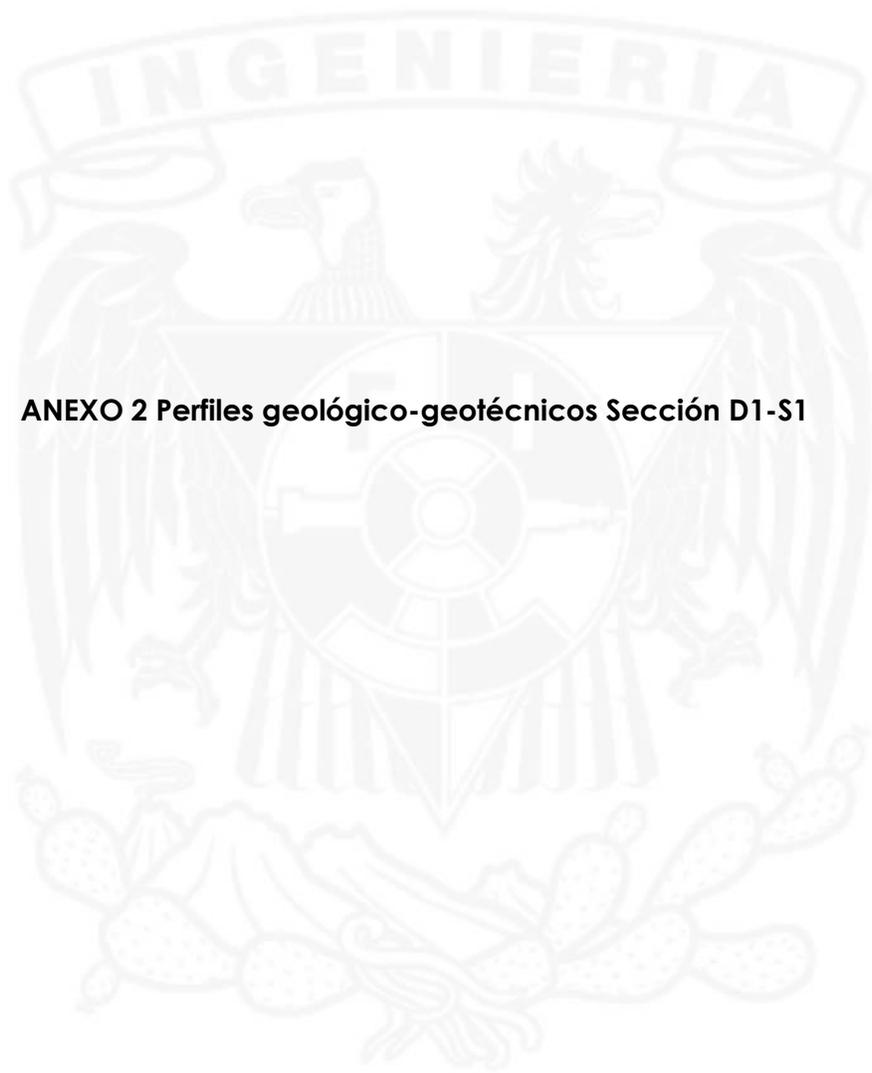
Sección:  
 D1-S1

Fecha:  
 Septiembre 2023

Elaboró:  
 Luis Alfonso Rodríguez Mora

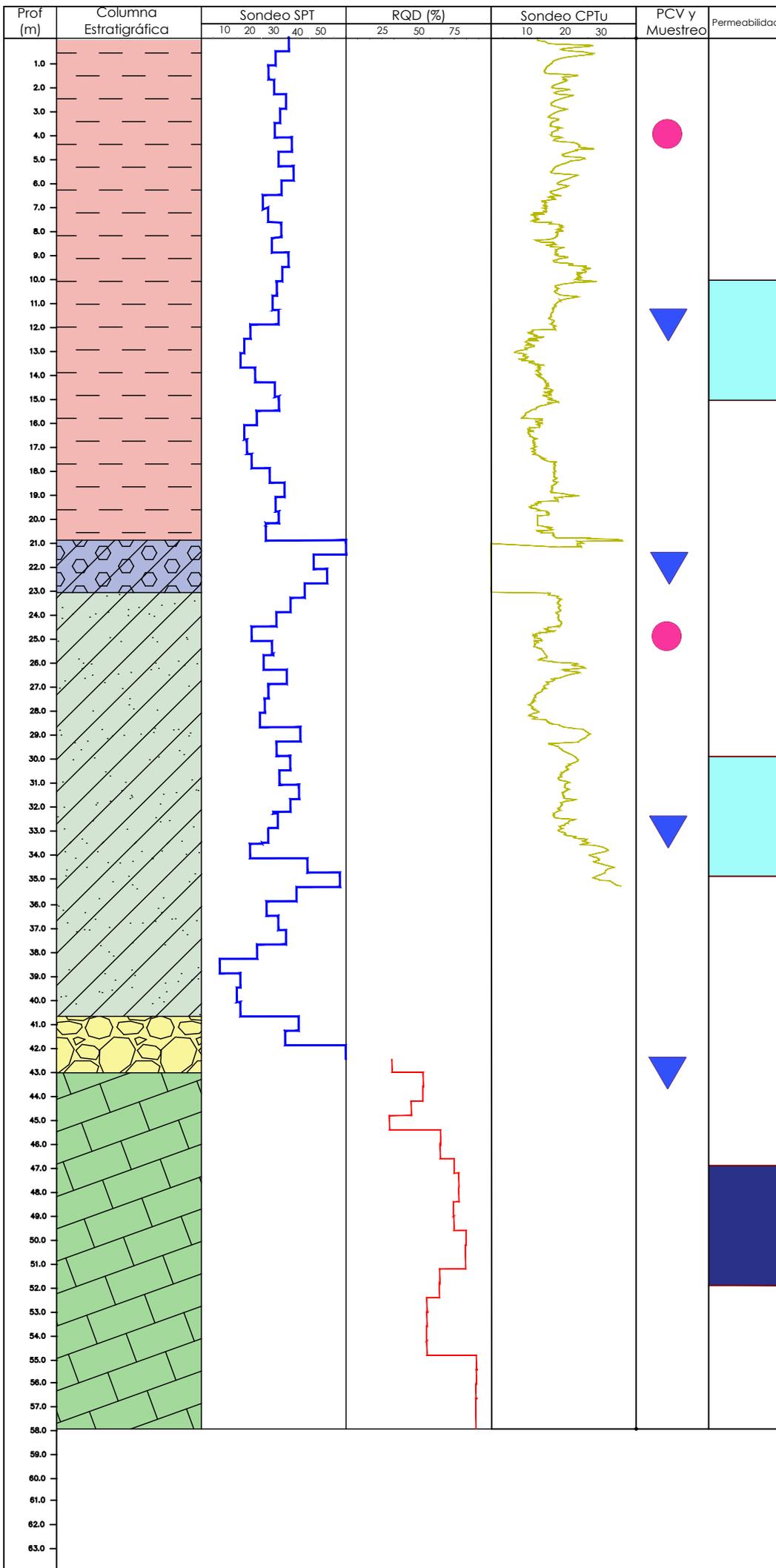
Revisó:  
 M.I. Victor Lojera Ochoa



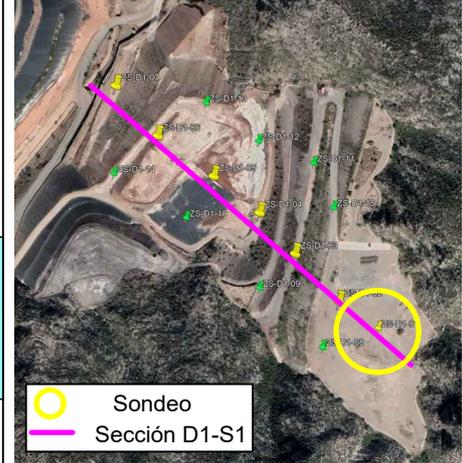


**ANEXO 2 Perfiles geológico-geotécnicos Sección D1-S1**

# ZS-D1-01



Ubicación del sondeo



### Coordenadas UTM

X	Y	Z
656092	2822160	1229.1

### Profundidades de Exploración

<b>Profundidad SPT:</b>	43.25 m
<b>Profundidad CPTu:</b>	35.79 m
<b>Profundidad roca:</b>	43.25-58 m

### Profundidades permeabilidad

<b>Prueba Lefranc</b>	10-15 m y 30-35 m
<b>Prueba Lugeon</b>	47-52 m

### Muestro inalterado

4 y 25 m
----------

### Profundidades de Instrumentación

<b>Piezómetros de Cuerda Vibrante</b>	12.5, 22, 33 y 43.25 m
---------------------------------------	------------------------

<b>Pozo de Observación</b>	-
----------------------------	---

<b>Notas:</b>	
---------------	--

--	--

--	--

### Simbología

PCV	
Muestro inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

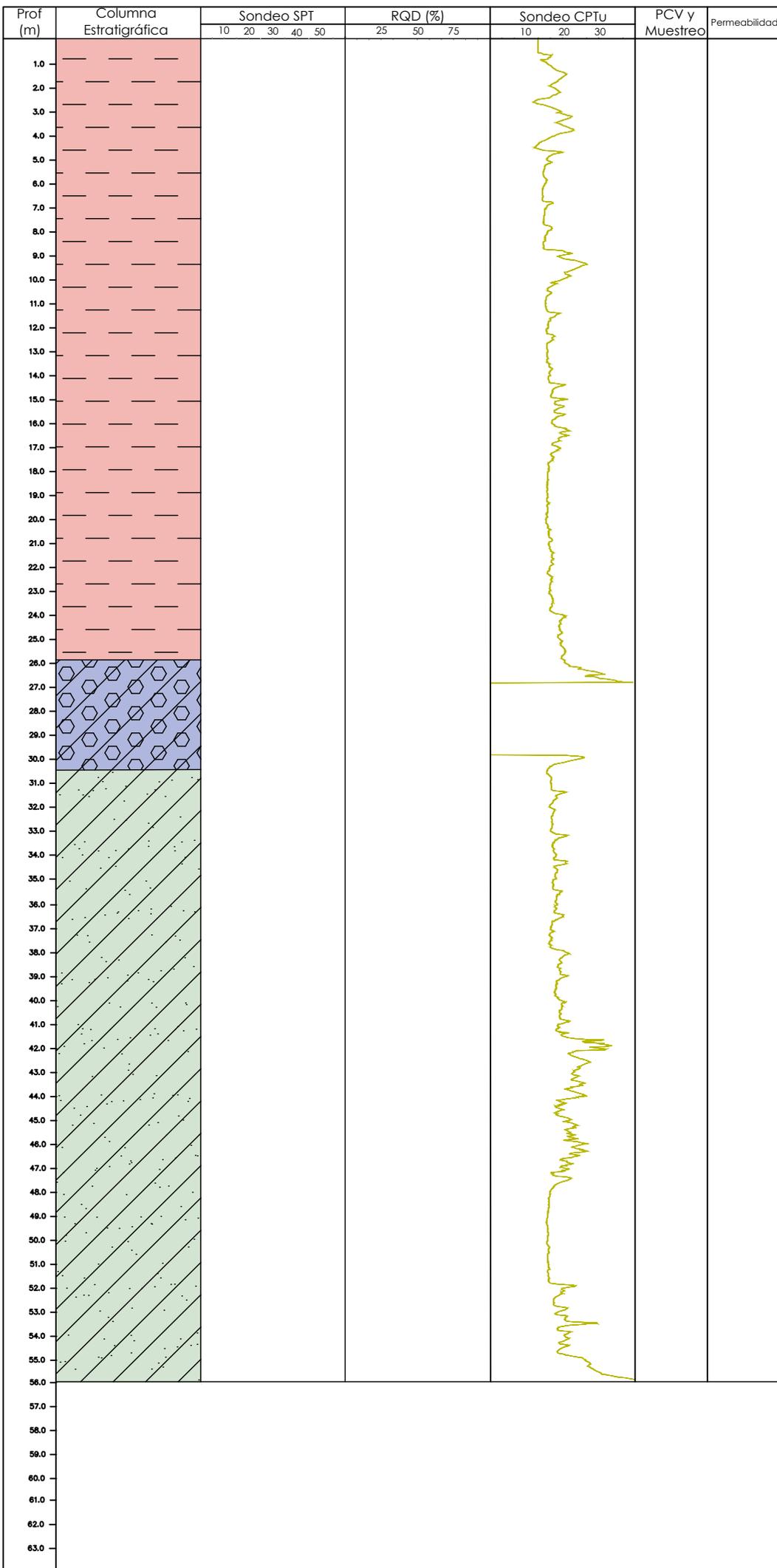
Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

División de Ciencias de la Tierra



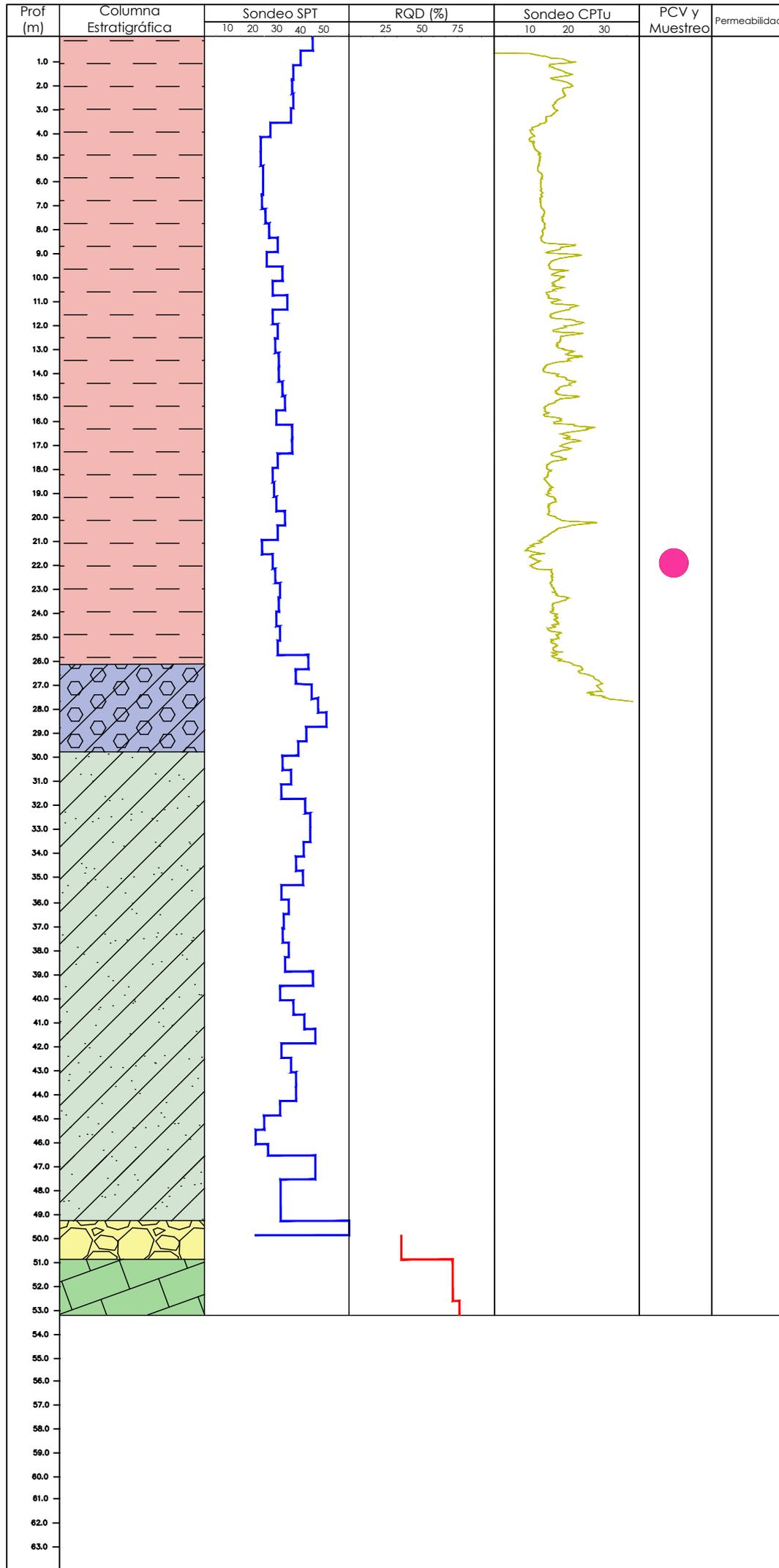
# ZS-D1-02



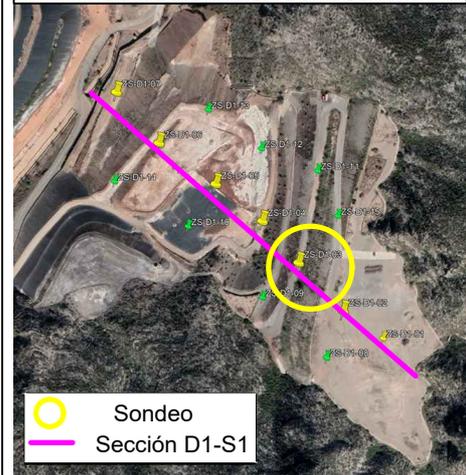
Coordenadas UTM		
X	Y	Z
656049	2822185	1229
<b>Profundidades de Exploración</b>		
<b>Profundidad SPT:</b>		-
<b>Profundidad CPTu:</b>		56.3 m
<b>Profundidad roca:</b>		-
<b>Profundidades permeabilidad</b>		
<b>Prueba Lefranc</b>		
-		
<b>Prueba Lugeon</b>		
-		
<b>Muestro inalterado</b>		
-		
<b>Profundidades de Instrumentación</b>		
<b>Piezómetros de Cuerda Vibrante</b>		
-		
<b>Pozo de Observación</b>		
-		
<b>Notas:</b>		
Sólo se realizó CPTu		

Simbología	
PCV	
Muestro inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

# ZS-D1-03



## Ubicación del sondeo



## Coordenadas UTM

X	Y	Z
656001	2822236	1213.82

## Profundidades de Exploración

Profundidad SPT:	50 m
Profundidad CPTu:	27.8 m
Profundidad roca:	50-53.5 m

## Profundidades permeabilidad

### Prueba Lefranc

-

### Prueba Lugeon

-

### Muestro inalterado

22 m

## Profundidades de Instrumentación

### Piezómetros de Cuerda Vibrante

-

### Pozo de Observación

-

### Notas:

-

## Simbología

PCV	
Muestro inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

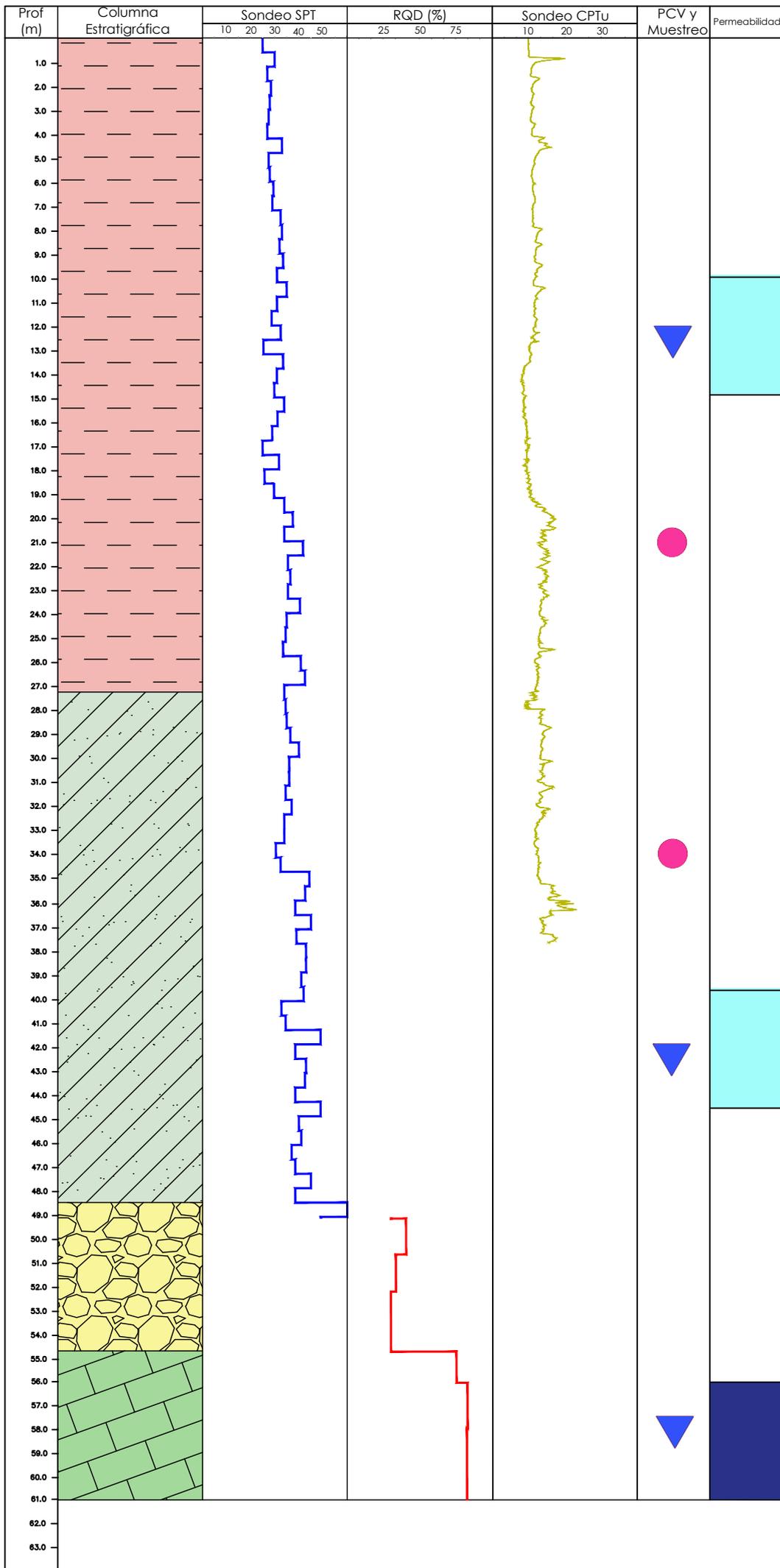
Universidad Nacional  
Autónoma de México

Facultad de  
Ingeniería

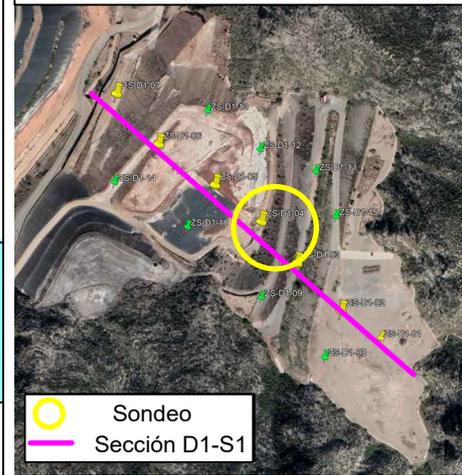
División de Ciencias  
de la Tierra



# ZS-D1-04



Ubicación del sondeo



○ Sondeo  
— Sección D1-S1

### Coordenadas UTM

X	Y	Z
655962	2822280	1206.42

### Profundidades de Exploración

<b>Profundidad SPT:</b>	49.2 m
<b>Profundidad CPTu:</b>	38 m
<b>Profundidad roca:</b>	49.2-61 m

### Profundidades permeabilidad

<b>Prueba Lefranc</b>
10-15 m y 40-45 m

<b>Prueba Lugeon</b>
56-61 m

<b>Muestro inalterado</b>
21 y 34 m

### Profundidades de Instrumentación

<b>Piezómetros de Cuerda Vibrante</b>
12.5, 42 y 58 m

<b>Pozo de Observación</b>
-

<b>Notas:</b>
No se instaló pozo de observación

### Simbología

PCV	
Muestro inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

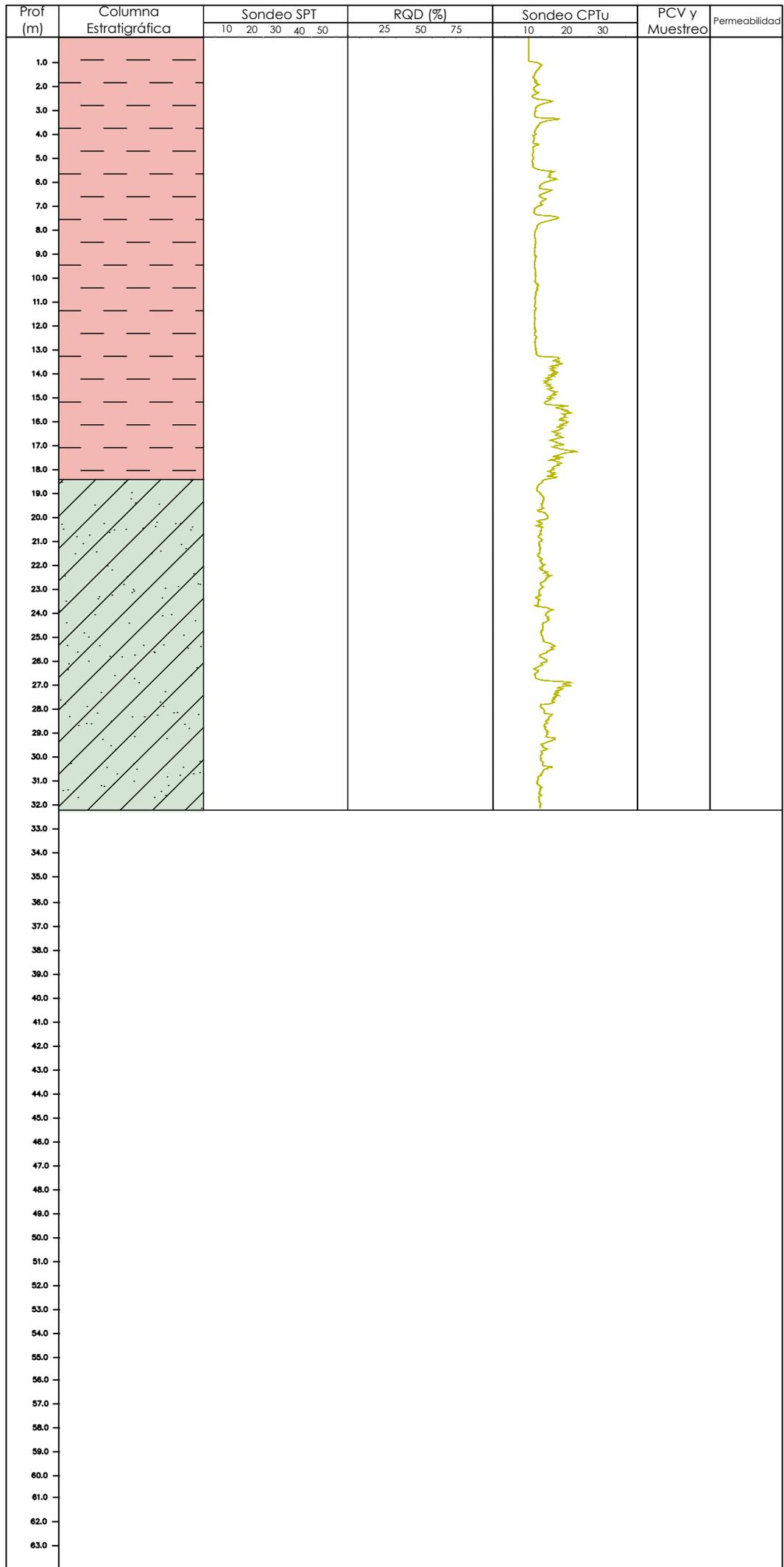
Universidad Nacional  
Autónoma de México

Facultad de  
Ingeniería

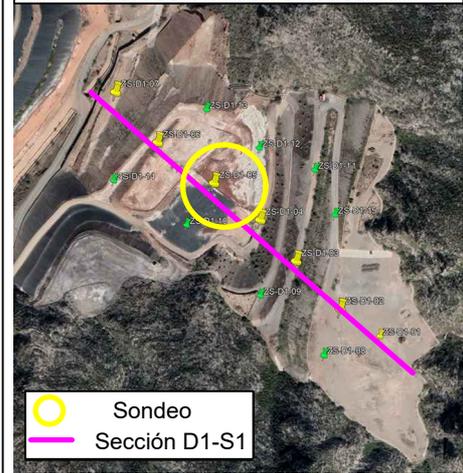
División de Ciencias  
de la Tierra



# ZS-D1-05



Ubicación del sondeo



○ Sondeo  
— Sección D1-S1

**Coordenadas UTM**

X	Y	Z
655912	2822319	1199.48

**Profundidades de Exploración**

<b>Profundidad SPT:</b>	-
<b>Profundidad CPTu:</b>	32.3 m
<b>Profundidad roca:</b>	-

**Profundidades permeabilidad**

<b>Prueba Lefranc</b>	-
<b>Prueba Lugeon</b>	-
<b>Muestro inalterado</b>	-

**Profundidades de Instrumentación**

<b>Piezómetros de Cuerda Vibrante</b>	-
<b>Pozo de Observación</b>	-

**Notas:**

Sólo se realizó CPTu

**Simbología**

PCV	
Muestreo inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

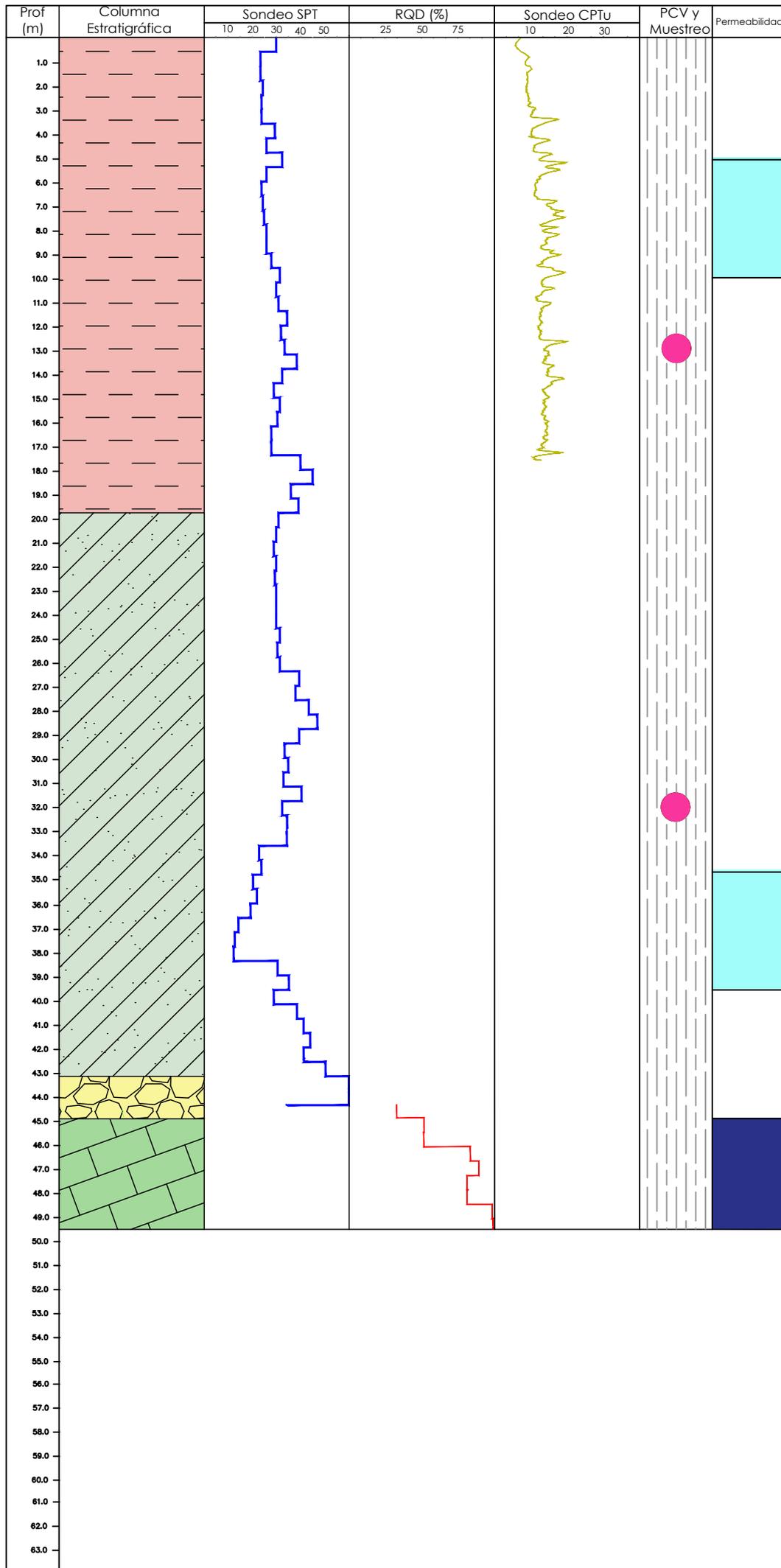
Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

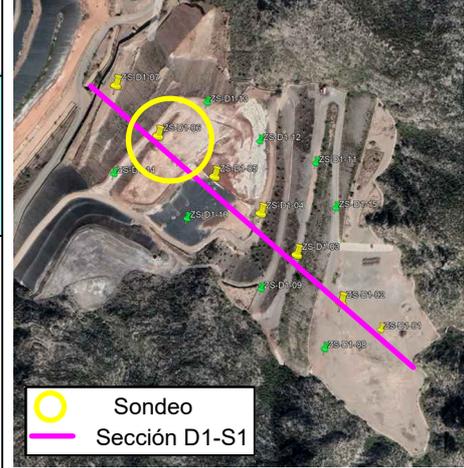
División de Ciencias de la Tierra



# ZS-D1-06



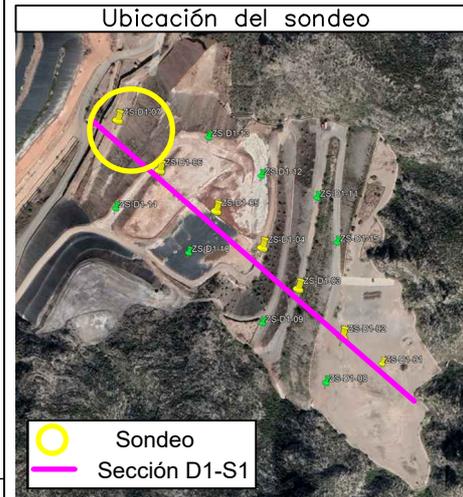
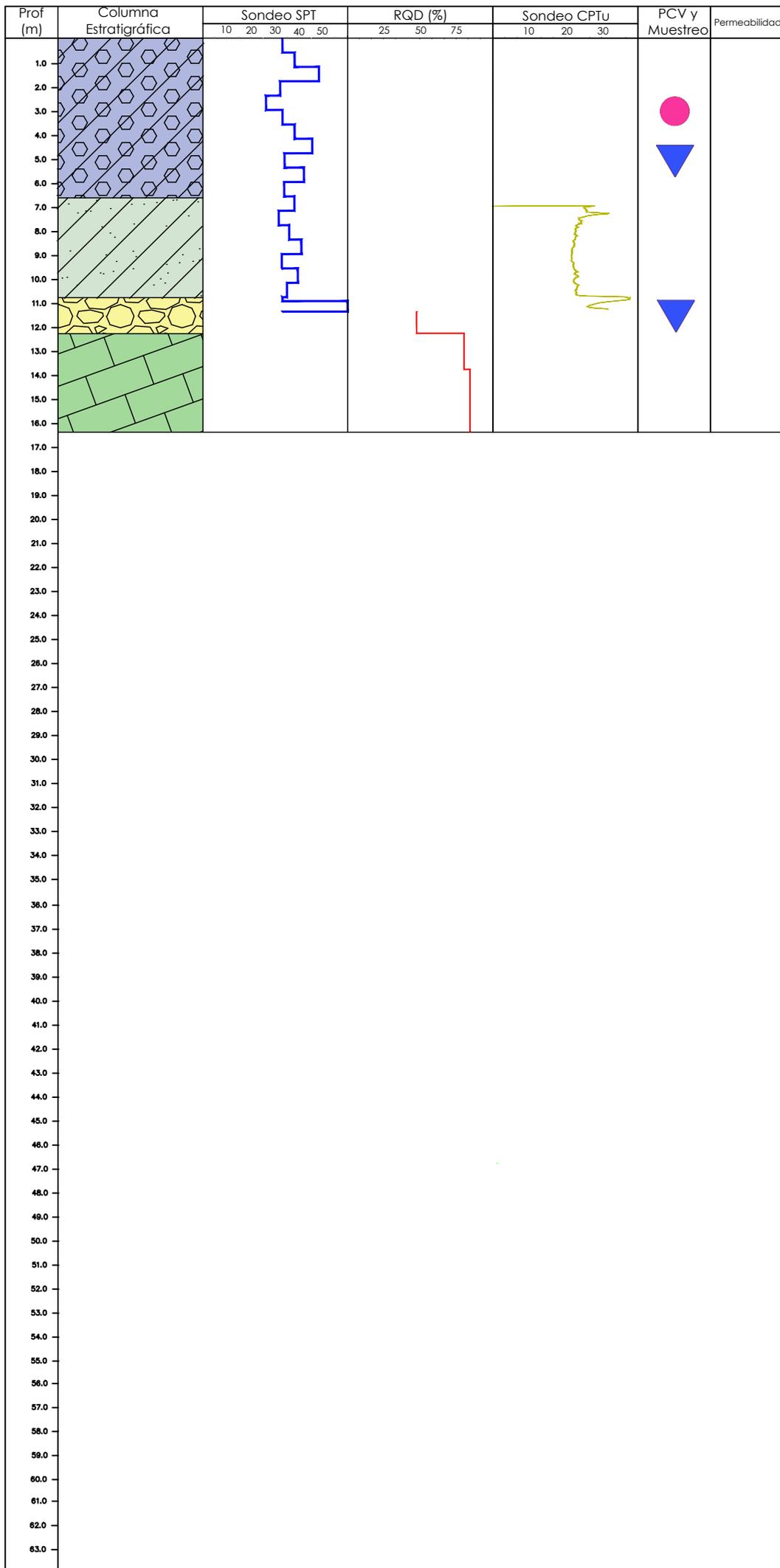
Ubicación del sondeo



Coordenadas UTM		
X	Y	Z
655851	2822362	1200
Profundidades de Exploración		
Profundidad SPT:		44.5 m
Profundidad CPTu:		17.8 m
Profundidad roca:		44.5-49.8 m
Profundidades permeabilidad		
Prueba Lefranc		
5-10 m y 35-40 m		
Prueba Lugeon		
45-49.8 m		
Muestro inalterado		
13 y 32 m		
Profundidades de Instrumentación		
Piezómetros de Cuerda Vibrante		
-		
Pozo de Observación		
49.8 m		
Notas:		
Sondeo con pozo de observación		

Simbología	
PCV	
Muestreo inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	

# ZS-D1-07



Coordenadas UTM		
X	Y	Z
655806	2822415	1164
Profundidades de Exploración		
Profundidad SPT:	11.45 m	
Profundidad CPTu:	6.8-11 m	
Profundidad roca:	11.45-16.45	
Profundidades permeabilidad		
Prueba Lefranc		
-		
Prueba Lugeon		
-		
Muestra inalterado		
3 m		
Profundidades de Instrumentación		
Piezómetros de Cuerda Vibrante		
5 y 11.45 m		
Pozo de Observación		
-		
Notas:		

Simbología	
PCV	
Muestreo inalterado	
Permeabilidad Lefranc	
Permeabilidad Lugeon	
SPTn	
qc	
RQD	